

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño de una red de Baja Tensión a escala

Autora: Marta Álvarez Moreno

Tutora: Esther Romero Ramos

**Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño de una red de Baja Tensión a escala

Autora:
Marta Álvarez Moreno

Tutora:
Esther Romero Ramos
Profesor Titular de Universidad

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Diseño de una red de Baja Tensión a escala

Autora: Marta Álvarez Moreno

Tutora: Esther Romero Ramos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi madre

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi tutora Esther, la oportunidad de trabajar con ella en este proyecto y por su atención y ayuda proporcionada durante estos meses de trabajo.

También me gustaría agradecer a toda mi familia en general por la confianza mostrada en mí, en especial a mi padre, Germán, porque gracias a su experiencia ha sabido aconsejarme y ayudarme en todo este camino.

Por supuesto, tampoco me puedo olvidar de mi hermano, Germán, ni de mi pareja Javier, porque a pesar de no entender muy bien en qué consistía este proyecto, me han dado los ánimos y la fuerza necesaria para seguir adelante.

Y por último agradecer a todos mis amigos en general, a los más cercanos en particular, por darme tantos momentos de risa y confianzas que han hecho que este camino sea muchísimo más fácil de llevar.

Marta Álvarez Moreno

Sevilla, 2018

Resumen

En el presente proyecto se pretende realizar un estudio de una red de baja tensión típica europea, para analizar su comportamiento ante escenarios de generación distribuida. Para ello, se ha tomado una red de referencia propuesta por la CIGRE. Esta red, es la que ha servido de base para realizar el modelo teórico y análisis eléctrico de la red que aquí se desarrolla. Este modelado y análisis no tiene solo como objetivo el estudio del comportamiento de las redes de baja tensión, sino que también busca definir y justificar la red a escala diseñada y construida en los laboratorios de la ETSI de la Universidad de Sevilla que replica la red real, además de desarrollar una herramienta que sirva de generación de escenarios válidos como entrada a la red a escala.

Este proyecto se divide en dos partes. En la primera de ellas, se detalla todo el modelado y diseño de esta red del laboratorio, especificando los componentes, equipos y dispositivos que la componen y justificando los parámetros que los caracterizan mediante análisis teóricos.

En la segunda parte, se presenta un análisis simulado de esta red de laboratorio a escala, realizado mediante la herramienta MATLAB. El resultado, va a compararse con el comportamiento equivalente de la red de referencia de baja tensión propuesta por la CIGRE. Para ello, se van a utilizar análisis de repartos de carga en ambas redes, para validar y verificar su funcionamiento. Una vez confirmada la igualdad en las soluciones, se procede a ensayar la red modelada mediante la simulación de diferentes desequilibrios en sus cargas.

Abstract

The aim of this project is to carry out a study of a typical European low voltage network, in order to analyze its behavior in the case of distributed generation scenarios. For this, a reference network proposed by CIGRE has been taken. This network is the one that has served as the basis for the theoretical model and electrical analysis of the network developed here. This modeling and analysis does not only aim to study the behavior of low voltage networks, but also seeks to define and justify the scale network designed and built in the ETSI laboratories of the University of Seville that replicates the real network, besides developing a tool that serves as a generation of valid scenarios as an entrance to the scale network.

This project is divided into two parts. In the first of them, all the modeling and design of this laboratory network is detailed, specifying the components, equipment and devices that compose it and justifying the parameters that characterize them through theoretical analysis.

In the second part, a simulated analysis of this scale laboratory network is presented, carried out using the MATLAB tool. The result will be compared with the equivalent behavior of the low voltage reference network proposed by CIGRE. To do this, load distribution analysis will be used in both networks to validate and verify its operation. Once the equality in the solutions has been confirmed, the modeled network is tested by simulating different load imbalances.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxii
1 Introducción	1
2 Objetivos y alcance del proyecto	3
3 Selección de la red a modelar	5
3.1 <i>Caso general de estudio</i>	5
3.1.1 Generalidades	5
3.1.2 Metodología de evaluación comparativa (Benhmarking)	5
3.1.3 Clasificación de las redes benchmark	6
3.1.4 Distribución de los DER en las benchmarks	6
3.2 <i>Selección de la red</i>	9
3.2.1 Configuración Europea	9
3.2.2 Datos de la red residencial	10
3.2.3 Datos de consumo diarios	14
4 Modelado de la red de laboratorio	15
4.1 <i>Configuración de la red de laboratorio</i>	15
4.1.1 Definición nudos y ramas	15
4.1.2 Representación gráfica de la red	17
4.2 <i>Modelado de componentes</i>	18
4.2.1 Alimentación de la red	18
4.2.2 Transformador	18
4.2.3 Líneas eléctricas	20
4.2.4 Puestas a tierra	29
4.3 <i>Parámetros principales</i>	29
4.3.1 Parámetros de las líneas	29
4.3.2 Parámetros de los nudos: cargas	31
4.3.3 Parámetros del transformador	32
4.4 <i>Factor de escala</i>	32

4.5	<i>Componentes reales utilizados en el montaje de la red</i>	34
4.5.1	Transformador	34
4.5.2	Impedancias de las ramas: Resistencias y reactancias	37
4.5.3	Emuladores de carga y acoplamientos de líneas: OLE	43
5	Validación teórica de la red a escala para consumos equilibrados	47
5.1	<i>Consideraciones previas</i>	47
5.1.1	Herramienta MATLAB	47
5.1.2	Método de barrido del árbol	47
5.2	<i>Redes a estudiar</i>	48
5.2.1	Red exacta	48
5.2.2	Red con las FIDI	49
5.2.3	Red real del laboratorio	49
5.3	<i>Simulaciones</i>	52
5.3.1	Redistribución de las cargas	52
5.3.2	Datos de entrada para la simulación de las redes	54
5.3.3	Simulación red exacta	54
5.3.4	Simulación red con FIDI	56
5.3.5	Simulación red real del laboratorio	57
5.4	<i>Resultados</i>	59
5.4.1	Resultados red exacta	59
5.4.2	Resultados red con FIDI	61
5.4.3	Resultados red real del laboratorio	64
5.5	<i>Conclusiones de los resultados</i>	69
6	Ensayos de la red a escala para consumos desequilibrados	71
6.1	<i>Desequilibrios</i>	71
6.1.1	Descripción de los desequilibrios a ensayar	71
6.2	<i>Ensayo 1: desequilibrio 40/30/30 alternado</i>	72
6.3	<i>Ensayo 2: desequilibrio 50/30/20 alternado</i>	73
6.4	<i>Ensayo 3: desequilibrio 40/30/30 total</i>	75
6.5	<i>Ensayo 4: desequilibrio 50/30/20 total</i>	77
7	Datos de entrada de para la red del laboratorio	79
8	Conclusiones del proyecto	81
Anexo A		83
Anexo B		113
Referencias		117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Parámetros redes americanas	8
Tabla 3-2. Parámetros redes europeas	8
Tabla 3-3. Datos transformador MT/BT	11
Tabla 3-4. Parámetros conductores subterráneos	11
Tabla 3-5. Conexiones y parámetros de las líneas de la red benchmark de baja tensión Europea	12
Tabla 3-6. Impedancias de los conductores subterráneos	12
Tabla 3-7. Datos de las cargas y factores de potencia.	13
Tabla 4-1. Definición de segmentos.	16
Tabla 4-2. Definición de las ramas.	17
Tabla 4-3. Definición de los nudos.	17
Tabla 4-4. Parámetros de las ramas en la red del laboratorio	29
Tabla 4-5. Impedancias de las ramas	31
Tabla 4-6. Datos de las cargas en la red del laboratorio	31
Tabla 4-7. Parámetros transformador	32
Tabla 4-8. Características transformador 400/400 V	35
Tabla 4-9. Impedancias escaladas de las ramas	37
Tabla 4-10. Resistencias de cada rama	38
Tabla 4-11. Inductancias de cada rama	40
Tabla 4-12. Propiedades inductancias	40
Tabla 4-13. Dimensiones inductancias	42
Tabla 4-14. Parámetros de los VSC	46
Tabla 5-1. Límites intensidades máximas	52
Tabla 5-2. Redistribución de cargas	53
Tabla 6-1. Desequilibrios propuestos	71
Tabla 6-2. Datos ensayo 1	72
Tabla 6-3. Análisis tensiones fase a desequilibrio 40/30/30 alternado	73
Tabla 6-4. Datos ensayo 2	74
Tabla 6-5. Análisis tensiones fase a desequilibrio 50/30/20 alternado	75
Tabla 6-6. Datos ensayo 3	75

Tabla 6-7. Análisis tensiones fase a desequilibrio 40/30/30 total	76
Tabla 6-8. Datos ensayo 4	77
Tabla 6-9. Análisis tensiones fase a desequilibrio 50/30/20 total	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Fotografía de la red completa de laboratorio	2
Figura 3-1: Jerarquía para la identificación de benchmarks	6
Figura 3-2. Configuración de DER en la red benchmark.	7
Figura 3-3. Equivalente de la red.	7
Figura 3-4. Topología de la red de baja tensión Europea	10
Figura 3-5. Geometría de los cables subterráneos	11
Figura 3-6. Datos consumo 24 h	14
Figura 4-1. Configuración red modelada	18
Figura 4-2. Modelo eléctrico transformador (1)	19
Figura 4-3. Modelo eléctrico transformador (2)	19
Figura 4-4. Modelo eléctrico de las líneas	20
Figura 4-5. Ejemplo traslación fuente de intensidad	21
Figura 4-6. Fuente dependiente genérica.	22
Figura 4-7. Fuente de tensión controlada por intensidad	22
Figura 4-8. Fuente de intensidad controlada por intensidad	22
Figura 4-9. Impedancia con FTDI	24
Figura 4-10. Impedancia con FIDI	25
Figura 4-11. Circuito completo con FIDI (1)	27
Figura 4-12. Circuito completo con FIDI (2)	28
Figura 4-13. Configuración red modelada. Información de las ramas	30
Figura 4-14. Configuración red modelada. Información de los nudos	32
Figura 4-15. Fotografía red laboratorio	34
Figura 4-16. Fotografía transformador (1)	35
Figura 4-17. Fotografía transformador (2)	36
Figura 4-18. Fotografía transformador (3)	37
Figura 4-19. Fotografía resistencias (1). HS200	38
Figura 4-20. Fotografía resistencias (2). HS300+disipador	39

Figura 4-21. Fotografía resistencias (3)	39
Figura 4-22. Fotografía inductancias	41
Figura 4-23. Fotografía inductancias (2). Detalle del montaje	41
Figura 4-24. Fotografía montaje impedancias (1)	42
Figura 4-25. Fotografía montaje impedancias (2)	42
Figura 4-26. Fotografía montaje impedancia (3)	43
Figura 4-27. VSC de dos niveles	43
Figura 4-28. Fotografía OLE (1)	44
Figura 4-29. Fotografía OLE (2)	44
Figura 4-30. Filtro LCL	45
Figura 4-31. Diagrama de bode a la intensidad inyectada frente a la tensión del VSC.	45
Figura 5-1. Representación rama circuito exacto	49
Figura 5-2. Representación rama circuito con FIDI	49
Figura 5-3. Representación rama circuito laboratorio	50
Figura 5-4. Detalle de FIDI equivalente (1)	50
Figura 5-5. Detalle de FIDI equivalente (2)	51
Figura 5-6. Representación de la red con las intensidades máximas	52
Figura 5-7. Representación gráfica redistribución de cargas	54
Figura 5-8. Tensiones abc circuito exacto	60
Figura 5-9. Tension neutro circuito exacto	60
Figura 5-10. Potencias circuito exacto	61
Figura 5-11. Tensiones abc circuito FIDI	61
Figura 5-12. Tensiones neutro circuito FIDI	62
Figura 5-13. Comparación tensiones nudos 1-6 circuito FIDI	62
Figura 5-14. Comparación tensiones nudos 7-12 circuito FIDI	63
Figura 5-15. Comparación tensiones neutro circuito FIDI	63
Figura 5-16. Potencias circuito FIDI	64
Figura 5-17. Comparación pérdidas circuito FIDI	64
Figura 5-18. FIFI equivalente en los nudos de tránsito	65
Figura 5-19. Tensiones abc circuito laboratorio	65
Figura 5-20. Tensiones neutro circuito laboratorio	66
Figura 5-21. Comparación tensiones nudos 1-6 circuito laboratorio	66
Figura 5-22. Comparación tensiones nudos 7-12 circuito laboratorio	67
Figura 5-23. Comparación tensiones en el neutro circuito laboratorio	67
Figura 5-24. Potencias circuito laboratorio	68
Figura 5-25. Comparación pérdidas circuito laboratorio	68
Figura 6-1. Tensiones abc desequilibrio 40/30/30 alternado	72
Figura 6-2. Tensiones neutro desequilibrio 40/30/30 alternado	73
Figura 6-3. Teniones abc desequilibrio 50/30/20 alternado	74

Figura 6-4. Tensiones neutro desequilibrio 50/30/20 alternado	74
Figura 6-5. Tensiones abc desequilibrio 40/30/30 total	76
Figura 6-6. Tensiones neutro desequilibrio 40/30/30 total	76
Figura 6-7. Tensiones abc desequilibrio 50/30/20 total	77
Figura 6-8. Tensiones neutro desequilibrio 50/30/20 total	78
Figura 7-1. Fotografía hoja Excel de datos de entrada	80
Figura B-1. Perfil de cargas caso equilibrado	113
Figura B-2. Perfil de cargas ensayo 1	113
Figura B-3. Perfil de cargas ensayo 2	114
Figura B-4. Perfil de cargas ensayo 3	114
Figura B-5. Perfil de cargas ensayo 4	115

Notación

A^*	Conjugado
$<$	Menor
$>$	Mayor
\leq	Menor o igual
\geq	Mayor o igual
\cong	Aproximadamente igual
V	Voltio
kV	Kilovoltio
A	Amperio
Hz	Hercios
kW	Kilovatio
kVAr	Kilovoltio-amperio reactivo
kVA	Kilovoltio-amperio
MVA	Megavoltio-amperio
°C	Grados centígrados
Ω	Ohmios
m	Metro
km	Kilometro
d_c	Diametro del conductor
R_{ac}'	Resistencia en continua a 90/70 °C
GMR	Radio medio geométrico
a	Distancia cable enterrado
DER	Distribution Energy Resource
CIGRE	Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas
FTDI	Fuente de Tensión Dependiente de Intensidad
FIDI	Fuente de Intensidad Dependiente de Intensidad
AT	Alta Tensión
MT	Media Tensión
BT	Baja Tensión

1 INTRODUCCIÓN

Resulta innegable afirmar que actualmente las redes eléctricas están en un continuo proceso de cambio y evolución. Estos cambios son de innumerables tipos (aumento progresivo de la carga, nuevas regulaciones, inclusión de nuevas tecnologías, etc) que nos llevan a que sea necesario que se produzca un cambio en la transmisión de potencia tal y como la conocemos.

Esta transmisión de potencia, se basaba originalmente en una circulación jerárquica, es decir, de más alta tensión a más baja. Este sistema, se está desestructurando desde el momento en el que se introducen dispositivos generadores en lugares donde la tensión es la misma que la que pudiese haber en nuestras casas. Estos nuevos dispositivos tienen evidentes ventajas, sobre todo a nivel medioambiental ya que se está apostando por la inclusión de fuentes de energía renovable (energía solar, eólica, mareomotriz, etc) en detrimento del uso de los combustibles fósiles. Sin embargo, también tienen sus inconvenientes en el sentido de funcionamiento de la red, que pasa a ser completamente diferente en cuanto a su comportamiento. Esto obliga a la investigación y aparición de nuevas tecnologías de control, automatización, maniobra o protección que tienen que hacer frente a estas novedades existentes sin olvidar la forma de actuar de sus predecesores, de forma que sigan cumpliendo sus principales funciones.

Toda esta situación a simple vista puede parecer algo caótica y dar a entender que únicamente complica lo que ya estaba perfectamente estudiado y controlado, con casi ningún cabo suelto sobre el que encontrar un pequeño fallo y casi ninguna posibilidad de error fatal. No obstante, toda esta situación supone la aparición de nuevos retos y objetivos para el campo de la ingeniería en general y de la ingeniería eléctrica en particular, que estará dispuesta a afrontarlos. Es y será necesario la investigación en numerosos campos para solventar todos los nuevos impactos y encontrar soluciones para el diseño de una nueva red eléctrica mucho más controlada.

Sin embargo, toda esta investigación necesita un paso previo de comprensión, análisis y estudio del comportamiento que va a tener la red de distribución ante estas nuevas generaciones. Esta es, por lo tanto, la motivación inicial de este proyecto, conocer, comprender y analizar la red de distribución. Para ello, se ha decidido estudiar una red de baja tensión típica europea, cuya definición y características se han basado en la red propuesta en [1]. Esta red, ha sido construida en el laboratorio con idea de hacer estudios y ensayos que sirvan de ejemplo para explicar estos nuevos comportamientos.



Figura 1-1. Fotografía de la red completa de laboratorio

Pero, ¿por qué es interesante estudiar una red de baja tensión? Como se ha explicado anteriormente, con la alta penetración de generación distribuida de pequeña escala en baja tensión, es muy probable que las redes de distribución presenten una serie de impactos relacionados con la calidad de la energía, la eficiencia del sistema de distribución y posibles sobrecargas de equipos. Aparecerán dificultades en aspectos como la regulación de tensión, el aumento de voltaje en el punto de conexión de la generación, pérdidas del sistema, límites de temperatura, no operación de los sistemas de protección, diferentes contribuciones a las faltas, aumento de armónicos, etc. Deben realizarse por este motivo estudios de estos impactos utilizando redes de referencia de casos adecuados para evaluar cuantificar los valores de generación permitidos dependiendo del tipo de red

Estudios de este tipo y otros similares nos ayudarán a responder preguntas de vital importancia en la ingeniería eléctrica, como pueden ser, cómo se va a comportar la red en sus tensiones más altas ante la inclusión de generación distribuida en la de baja o si es necesario incluir nuevos dispositivos de control de tensiones o potencia reactiva para garantizar los estándares exigidos en la regulación actual.

2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

Los objetivos principales de este proyecto van a ser dos. Por un lado, va a realizarse un diseño teórico de la red a escala en baja tensión construida en el laboratorio, partiendo del documento origen en el cual se basó su diseño. Se partirá de este modelo utilizado como referencia para posteriormente ir particularizando dentro del mismo y presentando los retos con los que se tuvo que hacer frente para sacar adelante la construcción de esta red. En segundo lugar, va a procederse a construir este modelo en MATLAB con la idea de verificar el funcionamiento de la red y ensayar los escenarios oportunos de desequilibrios.

La estructura seguida en este proyecto se expone a continuación, junto con una breve explicación del contenido que puede encontrarse en cada capítulo:

En el Capítulo 3, Selección de la red a modelar, se hará una breve presentación de las redes benchmarks que se están estudiando, haciendo especial hincapié en sus datos y principales diferencias. A continuación, se va a elegir una de las redes expuestas, para explicarla más detalladamente, conociendo sus datos más característicos. Esta red va a ser la que vayamos a estudiar y modelar en capítulos posteriores, para luego validar su funcionamiento.

En el Capítulo 4, Modelado de la red de laboratorio, se desarrollan todos y cada uno de los pasos que se han dado para modelar y diseñar la red seleccionada en el capítulo anterior, adecuándola a las restricciones propias del laboratorio y justificando el valor y la utilización de los componentes reales y equipos que la componen, así como su necesario escalado. Posteriormente, se va a proceder a exponer los mismos haciendo una breve explicación sobre sus magnitudes y parámetros.

En el Capítulo 5, Validación teórica de la red a escala para consumos equilibrados, se va a hacer una validación teórica de la red escalada. Para ello se va a presentar una simulación de la misma, en la que poder comprobar los resultados deseados. Esta simulación no solo contendrá la red escalada, sino que también hará uso de la red expuesta anteriormente en el Capítulo 4, considerada la red exacta, para comprobar cuanto difieren sus magnitudes en la simulación y su podemos considerar estos errores asumibles.

En el Capítulo 6, Ensayos de la red a escala para consumos desequilibrados, se van a presentar una serie de ensayos con desequilibrios que se han propuesto, observando y justificando los resultados obtenidos.

En el Capítulo 7, Datos de entrada para la red de laboratorio, se expondrá el formato utilizado para exportar todos los datos de la simulación que van a servir de entrada para simular escenarios en la red real del laboratorio.

Por último, en el Capítulo 8, sacaremos las conclusiones oportunas a lo expuesto anteriormente, proponiendo al mismo tiempo mejoras a incluir en la red que se está tratando.

3 SELECCIÓN DE LA RED A MODELAR

La red que se va a estudiar está presente en el documento “Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources” [1], desarrollado por el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE). Este documento, pretende establecer una base común para ensayar las nuevas tecnologías de redes inteligentes y la integración de recursos de energía distribuida (Distribution Energy Resources: DER, en sus siglas en inglés) en sistemas eléctricos. Para ello, ha desarrollado una metodología de análisis comparativos (benchmarking) propia que cubren de una forma exclusiva y exhaustiva los retos de integración que los DER han puesto sobre la mesa. Siguiendo este principio, se han desarrollado una serie de sistemas de referencia complementarios para facilitar el análisis de los DER en todos los niveles de tensión posibles y con el suficiente nivel de detalle.

3.1 Caso general de estudio

3.1.1 Generalidades

Resulta de gran interés y utilidad establecer una base común para ensayar la integración de los DER y las tecnologías de Smart Grid en la red eléctrica actual. Estas inclusiones de nuevas tecnologías destacan por su gran diversidad y tipologías. El documento [1], ha estado al tanto de esta diversidad y para ello ha desarrollado una metodología de benchmarking muy distintiva cuyo principal objetivo es cubrir todo el espectro de la integración de los DER en la red eléctrica de una manera lo más exhaustiva y colectiva posible.

La forma de proceder de [1], ha sido incluyendo benchmarks de todo tipo de redes, desde tensiones más altas a las más bajas, incluyendo también las versiones norteamericana y europea de cada red. Con este concepto de globalización de la metodología consigue la mayor inclusividad de la que se hablaba anteriormente.

Antes de empezar a explicar la metodología benchmarking, es necesario destacar que el documento invita a los usuarios a hacer uso de su metodología, pero deja la puerta abierta a cambiar ciertos requerimientos y adaptarlos a sus propias redes regionales con idea de obtener resultados beneficiosos para el entorno.

3.1.2 Metodología de evaluación comparativa (Benchmarking)

Un sistema de energía eléctrica se describe por la estructura de su red y los recursos conectados a sus nudos. Un equivalente de la red conectado a un DER es, en sí mismo, un adecuado candidato a red benchmark, ya que muchas de las técnicas para la integración de renovables y generación distribuida dependen del control de los recursos y de los convertidores basados en electrónica de potencia. Sin embargo, en el lado de la red sí que sería necesaria una especificación más exhaustiva, ya que existen muy diversos tipos de redes. En este contexto, es necesario distinguir entre las redes de transporte y las redes de distribución.

Estas últimas, pueden variar significativamente sus características dependiendo del nivel de tensión y preferencias locales. Juntos, transporte en alta tensión (AT), distribución en media tensión (MT), y las redes de distribución de baja tensión (BT) representan un conjunto adecuado de candidatos para benchmarks del lado de la red.

Los benchmarks de los DER se derivan de acuerdo con la jerarquía de la Figura 3-1 en la que los elementos subrayados indican las referencias. Cada benchmark, se diferenciará posteriormente en versiones europeas y norteamericanas.

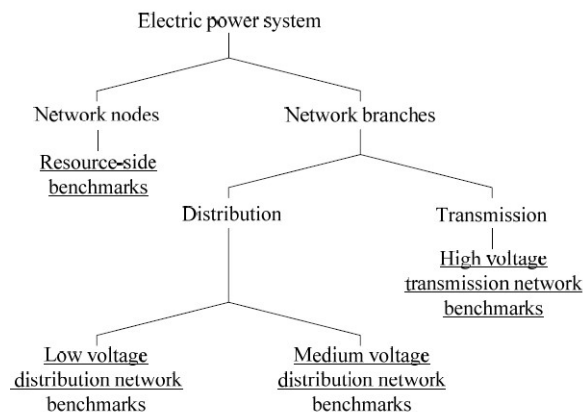


Figura 3-1: Jerarquía para la identificación de benchmarks

3.1.3 Clasificación de las redes benchmark

De esta forma, se establecen una serie de redes tipo que se pueden clasificar en función de los siguientes parámetros:

- *Tensión*: diferenciando Alta, Media y Baja Tensión.
- *Localización*: diferenciando redes tipo “Norteamericana” y “Europea” para cada una de las redes de referencia. Básicamente, esta diferenciación se debe a los dos valores de frecuencia nominal distintos que se utilizan en ambos lugares: 60 Hz en el caso americano y 50 Hz en el europeo. Si bien es necesario recordar que también otras partes del mundo utilizan éstas frecuencias nominales.

3.1.4 Distribución de los DER en las benchmarks

Este benchmark se desarrolló con el fin de estudiar los efectos de la interconexión de renovables y recursos energéticos distribuidos con sistemas de energía eléctrica y para análisis detallados de topologías específicas de estos recursos y estrategias de control. Para este propósito, es deseable tener una configuración de referencia. Esta configuración, se puede ajustar usando los datos recomendados para estudiar recursos con potencias que van desde unos pocos kW en baja sistemas de baja tensión, a cientos de MW en sistemas de alta tensión.

3.1.4.1 Configuración

El ejemplo del recurso de una red benchmark se muestra en la Figura 3-2. Consiste en un bus AC conectado a una red equivalente. Los módulos DER y de carga local se conectan al bus AC a través de los interruptores S1 y S2, que permiten realizar diferentes configuraciones y pruebas. La red equivalente está conectada a través del interruptor S3 que permite la configurar la isla de los DER y cargas. Un ejemplo más detallado de DER se representa en el módulo DER 2, donde un sistema de fuentes, módulos de carga y almacenamiento complementarios están vinculados a un bus de CC y a una electrónica de potencia. El convertidor conecta el

sistema con el bus AC. Se pueden agregar módulos DER adicionales para estudiar los efectos de los DER en paralelo. Hay que tener en cuenta que, ante un posible aumento de voltaje, pueden necesitarse transformadores de aislamiento dentro de los módulos DER dependiendo de los niveles de tensión, potencia y requisitos de servicio.

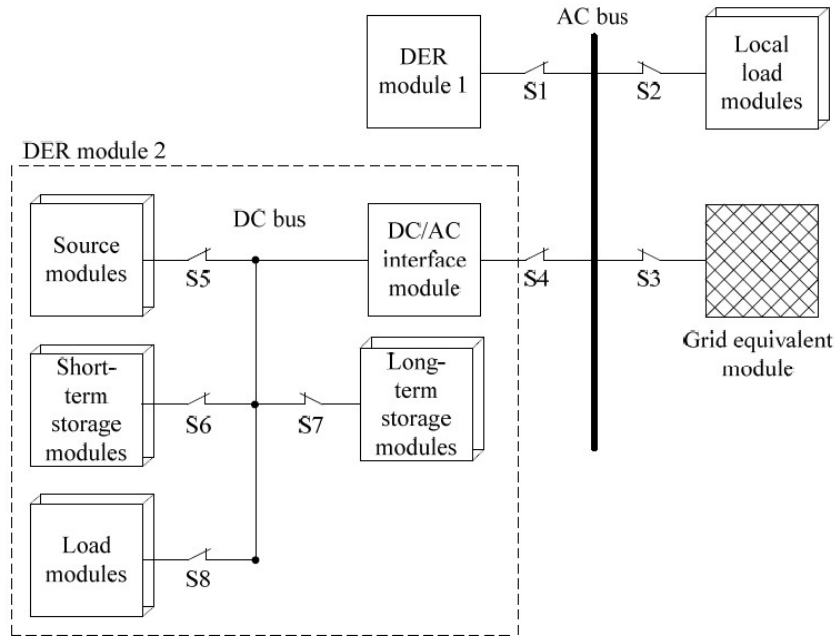


Figura 3-2. Configuración de DER en la red benchmark.

La red equivalente para la interconexión con los módulos DER se muestra en la Figura 3-3. Consiste en una fuente tensión de AC detrás de una impedancia en serie. La fuente de tensión está especificada por su nivel de voltaje, V_G , la potencia de cortocircuito, S_{SC} y la impedancia, que se especifica como Z_G . Los valores de los parámetros para el equivalente de la red varían según el nivel de tensión de los módulos DER que están conectados a la misma. Se dan valores típicos para estos parámetros a continuación en la Sección 3.1.4.2 para sistemas americanos y en la Sección 3.1.4.3 para los sistemas europeos.

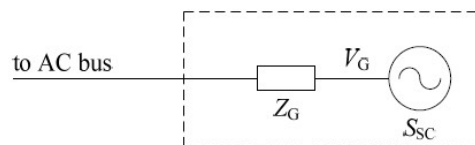


Figura 3-3. Equivalente de la red.

3.1.4.2 Red Norteamericana

La frecuencia del sistema para el equivalente de la red americana es de 60 Hz. Se pueden seleccionar diferentes niveles de tensión dependiendo de la conexión de red deseada. Los límites de transferencia de potencia son los que restringen los intervalos de potencia de los DER que pueden conectarse a una red determinada. La Tabla 3-1 proporciona los valores típicos para los parámetros del equivalente de la red americana. Los valores de tensión de red dados son los habituales de los niveles de baja, media y alta tensión reales de Norteamérica. Hay que tener en cuenta, que los tres valores de tensión de la red BT que se dan en la tabla, corresponden a los tres diferentes tipos de sistemas de BT que se encuentran en los sistemas de Norteamérica: residencial, comercial e

industrial, respectivamente. La potencia de cortocircuito, S_{SC} , se da como un rango para proporcionar flexibilidad a la hora de considerar el impacto de los recursos en la tensión del sistema: los valores grandes de S_{SC} corresponden a redes fuertes, mientras que los valores pequeños de S_{SC} corresponden a redes débiles.

Tabla 3-1. Parámetros redes americanas

Nivel de tensión	Tensión de la red [kV] ¹	Potencia de cortocircuito [MVA]	Ratio R/X
Baja Tensión	0,12/0,208/0,48 ²	1 a 10	0,70 a 11,00
Media Tensión	12.47	100 a 1000	0,40 a 2,00
Alta tensión	230	5000 a 20000	0,07 a 0,60

3.1.4.3 Red Europea

La frecuencia del sistema para el equivalente de la red europea es de 50 Hz. Se pueden seleccionar diferentes niveles de tensión dependiendo de la conexión de red deseada. La Tabla 3-2 da los valores típicos de los parámetros necesarios de la red europea equivalente. Las tensiones de la red de los valores dados son típicas de los niveles de tensión reales de baja, media y alta de Europa. Como en el caso americano, la potencia de cortocircuito, S_{SC} , se da como un rango para proporcionar flexibilidad a la hora de considerar el impacto de DER en la tensión del sistema.

Tabla 3-2. Parámetros redes europeas

Nivel de tensión	Tensión de la red [kV]	Potencia de cortocircuito [MVA]	Ratio R/X
Baja Tensión	0,4	1 a 10	0,70 a 11,00
Media Tensión	20	100 a 1000	0,40 a 2,00
Alta tensión	220	5000 a 20000	0,07 a 0,60

3.1.4.4 Flexibilidad

Los parámetros de referencia pueden ser modificados. Algunas pautas sobre cómo cambiar los parámetros se dan a continuación:

- *Tensión*: La tensión de red recomendada se puede cambiar dentro de los requisitos del estudio para ser realizado. Es preferible que el valor elegido sea una tensión común instalada.
 - Caso red americana³:
 - Alta tensión (AT): 115 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV y 765 kV.
 - Media tensión (MT): 4.6 kV, 12.0 kV, 12.47 kV, 13.2 kV, 13.8 kV, 21.6 kV, 22 kV, 24.9 kV, 34.5 kV, y 69 kV.
 - Baja tensión (BT): las tensiones de línea y de fase respectivamente son para monofásico 120 V y 240 V y para trifásico 208 V y 480 V.
 - Caso red europea:
 - Alta tensión (AT): 110 kV, 132 kV, 150 kV, 220 kV, 225 kV, 380 kV y 400 kV;

¹ Valor RMS de la tensión de línea

² Valores para red residencial, comercial e industrial respectivamente. Valor RMS de fase.

³ En caso que no se indique lo contrario, todos son valores RMS de tensión de línea.

- Media tensión (MT): 6.6 kV, 10 kV, 11 kV, 12 kV, 15 kV, 20 kV y 36 kV;
 - Baja tensión (BT): son 380 V, 400 V y 415 V.
- Frecuencia: es posible perturbar los valores de la frecuencia de red. Este tipo de situaciones resultan de interés cuando se está comprobando el comportamiento de la red ante valores anormales de este parámetro.

3.2 Selección de la red

Para este proyecto se ha seleccionado la red de baja tensión en su versión Europea. Esta red es una representación de una red real de baja tensión la cual presenta una estructura sencilla y, además, posee una gran flexibilidad en el estudio en la integración de fuentes de energía renovables. La red original comprende tres feeders, una correspondiente solo a carga residencial, otra que concentra sólo carga industrial y la tercera que agrupa las comerciales. En este capítulo nos encargaremos de definir en profundidad esta red seleccionada, dando valores a cada uno de los parámetros y elementos que la componen.

3.2.1 Configuración Europea

- *Estructura*: las redes físicas de distribución BT generalmente se originan a partir de un transformador MT / BT y habitualmente tienen una estructura radial.¹ La red de distribución de BT puede incluir una o múltiples líneas. Los consumidores están conectados en cualquier lugar a lo largo de las líneas. La frecuencia del sistema es 50 Hz.
- *Simetría*: la conexión de consumidores monofásicos hace que las redes de distribución de BT sean inevitablemente desequilibradas, si bien se suele repartir entre las fases buscando una simetría trifásica global.
- *Tipos de línea*: las líneas de la red BT son subterráneas, se encuentran principalmente en áreas urbanas con un alto consumo y en las zonas rurales con un bajo consumo. Las líneas aéreas se construyen principalmente con conductores desnudos hechos de Al. Las variaciones existen los cables generalmente están encerrados en un conducto metálico o galvanizado.
- *Puesta a tierra*: depende de las preferencias de cada distribuidora. Habitualmente están puestas a tierra o con neutro aislado.

3.2.1.1 Topología

La topología de la red Europea de baja tensión benchmark se muestra en la Figura 3-4. Ésta muestra los tres feeders anteriormente descritos, residencial, comercial e industrial. Como se observa en la figura, se pueden seleccionar con los interruptores S1, S2 y S3 las subredes con las que se desea realizar el estudio. En las subredes residencial e industrial se han usado cables subterráneos mientras que en la subred comercial las conexiones se establecen a través de líneas aéreas.

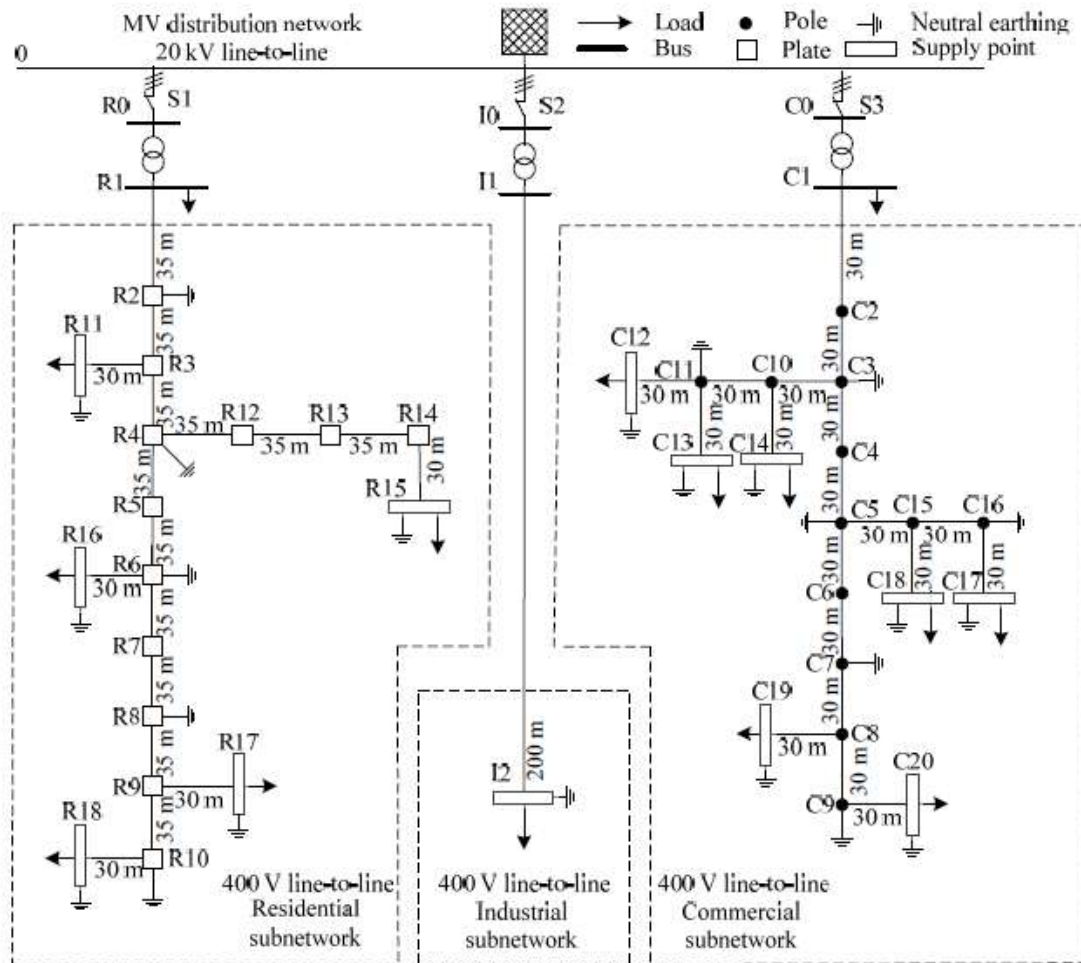


Figura 3-4. Topología de la red de baja tensión Europea

En nuestro caso particular de estudio, escogeremos una única subred con el fin de reducir la red a una dimensión aceptable que pueda ser reproducida con exactitud en el laboratorio. Se escogerá la subred residencial.

3.2.2 Datos de la red residencial

3.2.2.1 Red de Media Tensión

Las características de la red de media tensión son las siguientes:

- Tensión nominal: 20 kV.
- Potencia de cortocircuito: 100 MVA
- Ratio $R/X=1$

3.2.2.2 Transformador

Los datos del transformador de MT/BT de la línea residencial están expuestos en la siguiente tabla. Es necesario

destacar que la impedancia está referida al secundario del transformador.

Tabla 3-3. Datos transformador MT/BT

Desde nudo	Hasta nudo	Grupo de conexión	V1 (kV)	V2 (kV)	Z (Ω)	S (kVA)
R0	R1	Dyn	20	0,4	0,0032+j0,0128	500

3.2.2.3 Tipos de conductor

A continuación, se detallarán los tipos de conductores presentes en cada línea del feeder residencial. Cómo se ha comentado anteriormente son todos subterráneos y están instalados de la forma en que se indica en la Figura 3-5, estando constituido por 4 hilos: las 3 fases y el neutro.

LV underground cables

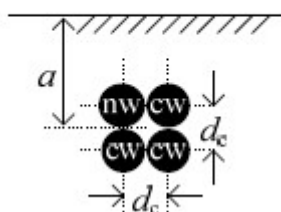


Figura 3-5. Geometría de los cables subterráneos

Dónde “cw” son los conductores de fase y “nw” el conductor del neutro.

En la Tabla 3-4 se muestran algunos parámetros de los cables que conforman la red residencial.

Tabla 3-4. Parámetros conductores subterráneos

Nombre conductor	Tipo	Diámetro (mm^2)	Número de hilos	d_c (cm)	R'_{ac} a $90^\circ C$ / $70^\circ C$ (Ω/km)	GMR (cm)	a (m)
UG1	NA2XY	240	1	1,75	0,162	0,634	0,90
UG2	NA2XY	150	1	1,38	0,265	0,501	0,90
UG3	NA2XY	50	1	0,80	0,822	0,289	0,90

Los tipos de conductores son designados usando la notación de la norma German DIN VDE para cables subterráneos [2]. Valores de R'_{ac} y d_c son obtenidos de las tablas 5.6.2 y tabla 5.1.13 de [3] y GMR de la tabla 2.6 de [4].

Se va a proceder a especificar en la Tabla 3-5 los parámetros de las líneas que componen la red de baja tensión original. Podemos observar el tipo de conductor de cada rama, así como la longitud de la línea y el tipo de instalación. Recordamos que en el caso de la red residencial se trata de una red subterránea.

Tabla 3-5. Conexiones y parámetros de las líneas de la red benchmark de baja tensión Europea

Desde nudo	Hasta nudo	Tipo conductor	Longitud (m)	Instalación
R1	R2	UG1	35	UG 3-ph
R2	R3	UG1	35	UG 3-ph
R3	R4	UG1	35	UG 3-ph
R4	R5	UG1	35	UG 3-ph
R5	R6	UG1	35	UG 3-ph
R6	R7	UG1	35	UG 3-ph
R7	R8	UG1	35	UG 3-ph
R8	R9	UG1	35	UG 3-ph
R9	R10	UG1	35	UG 3-ph
R3	R11	UG3	30	UG 3-ph
R4	R12	UG3	35	UG 3-ph
R12	R13	UG3	35	UG 3-ph
R13	R14	UG3	35	UG 3-ph
R14	R15	UG3	30	UG 3-ph
R6	R16	UG3	30	UG 3-ph
R9	R17	UG3	30	UG 3-ph
R10	R18	UG3	30	UG 3-ph

También es necesario conocer el valor propuesto de las impedancias de fase de cada uno de los tipos de conductor subterráneo expuestos.

Tabla 3-6. Impedancias de los conductores subterráneos

Tipo Conductor	Matriz de impedancias primitiva (Ω/km)				
		A	B	C	N
UG1	A	$0,211 + j0,747$	$0,049 + j0,673$	$0,049 + j0,651$	$0,049 + j0,673$
	B	$0,049 + j0,673$	$0,211 + j0,747$	$0,049 + j0,673$	$0,049 + j0,651$
	C	$0,049 + j0,651$	$0,049 + j0,673$	$0,211 + j0,747$	$0,049 + j0,673$
	N	$0,049 + j0,673$	$0,049 + j0,651$	$0,049 + j0,673$	$0,211 + j0,747$
UG3	A	$0,871 + j0,797$	$0,049 + j0,719$	$0,049 + j0,697$	$0,049 + j0,719$
	B	$0,049 + j0,719$	$0,871 + j0,797$	$0,049 + j0,719$	$0,049 + j0,697$
	C	$0,049 + j0,697$	$0,049 + j0,719$	$0,871 + j0,797$	$0,049 + j0,719$
	N	$0,049 + j0,719$	$0,049 + j0,697$	$0,049 + j0,719$	$0,871 + j0,797$

3.2.2.4 Datos de las cargas

La Tabla 3-7 muestra los valores de pico de cada nudo con carga de la red. Cada carga representa a un grupo de

consumidores. Como se puede observar, también se proporciona el factor de potencia para cada carga. Este factor de potencia es función del número de consumidores servidos en cada nudo.

Tabla 3-7. Datos de las cargas y factores de potencia.

Nudo	S (kVA)	Factor de potencia, <i>pf</i>
R11	15	0,95
R15	52	0,95
R16	55	0,95
R17	35	0,95
R18	47	0,95

Para determinar la carga equivalente en una línea es necesario aplicar el factor de simultaneidad apropiado para las cargas que están alimentándose en esa parte de la línea. Los factores de simultaneidad también deben tenerse en cuenta cuando usamos subredes que no están modeladas en detalle y se supone una única carga genérica que engloba a todas las que hay aguas abajo. El número de cargas aguas abajo, o lo que es lo mismo, el número de consumidores servidos (N_{1d}), va a afectar en el valor de este factor de simultaneidad al agrupar las cargas en una. Esta carga equivalente se ha calculado de la siguiente forma:

$$S_{nudo} = f_{sim} \cdot \sum_{k=1}^{N_{1d}} S_k \quad (3-1)$$

Donde el factor de simultaneidad f_{sim} , se calcula mediante la ecuación:

$$f_{sim} = 0,6 \cdot \left(1 + \frac{1}{N_{1d}}\right) \quad (3-2)$$

La Tabla 3-7 también muestra el valor del factor de potencia para cada una de las cargas equivalentes en cada nudo, que se ha calculado como se muestra a continuación.

Por un lado, hallamos la potencia activa y reactiva equivalente de cada consumidor individual (recordemos que hay N_{1d} consumidores):

$$P_{eq} = \sum_{k=1}^{N_{1d}} (S_k \cdot pf_k) \quad (3-3)$$

$$Q_{eq} = \sum_{k=1}^{N_{1d}} S_k \cdot \text{sen}(\arccos(pf_k)) \quad (3-4)$$

Dónde pf_k es el valor del factor de potencia de cada carga individual.

De esta forma solo nos quedaría aplicar la ecuación (3-3) y (3-4) para calcular nuestro factor de potencia equivalente en cada nudo:

$$pf_{eq} = P_{eq} / \sqrt{P_{eq}^2 + Q_{eq}^2} \quad (3-5)$$

3.2.3 Datos de consumo diarios

Para la red de baja tensión Europea, se propone también un perfil diario de carga para cada uno de los tipos de carga. Este perfil, se corresponde con un perfil típico de una red de baja tensión de cualquier zona europea, con el valle de consumo en horas más tempranas y la punta en torno a las 20 h.

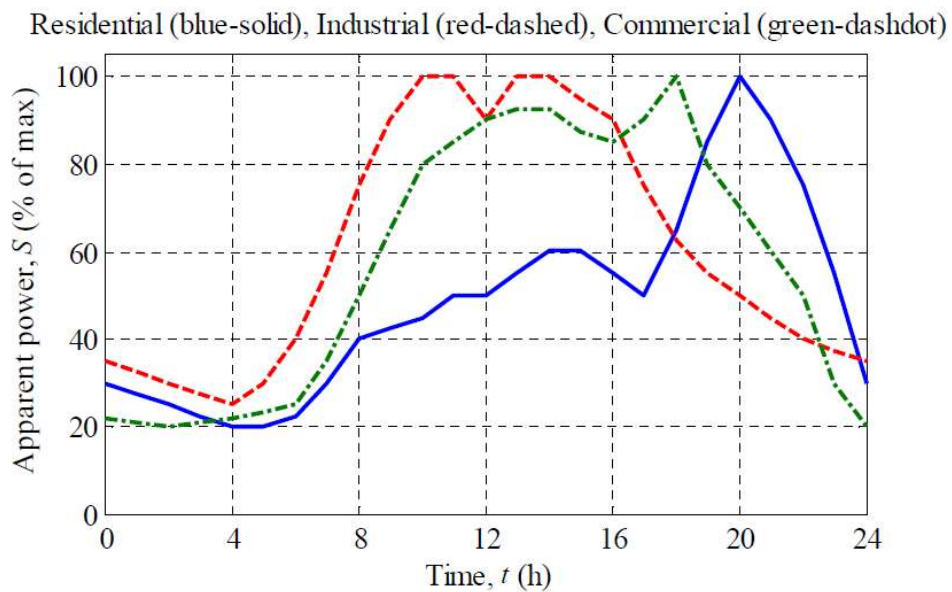


Figura 3-6. Datos consumo 24 h

La Figura 3-6 representa el consumo porcentual de cada tipo de carga durante un día, teniendo datos cada 15 minutos. Este perfil va a ser utilizado como modelo para definir el comportamiento de todas las cargas que componen la red.

4 MODELADO DE LA RED DE LABORATORIO

Una vez descrita y seleccionada la red a reproducir en el laboratorio, hay que tener en cuenta una serie de limitaciones de las que disponemos, o lo que es lo mismo, modelar la red que se va a instalar en el laboratorio. La red va a tener una serie de restricciones y simplificaciones que se explicarán detalladamente en este capítulo. El objetivo va a ser siempre parecerse lo más posible a la red detallada en el capítulo anterior, con idea de obtener unos resultados similares a los que se obtendrían con la red exacta.

4.1 Configuración de la red de laboratorio

4.1.1 Definición nudos y ramas

No es posible reproducir en el laboratorio la red exacta que se ha detallado en la Sección 3.2.1 debido a sus dimensiones. Por este motivo se va a proceder a simplificar esta distribución de forma que siga cumpliendo las mismas características generales (parámetros, tipo de conductor, etc) que la red en la que nos estamos basando. Por ello, se va a explicar la distribución que se ha realizado de la misma en el laboratorio, agrupando algunos de los segmentos convenientemente.

En primer lugar, se van a definir los segmentos de la red original con la que estamos trabajando para que posteriormente su agrupación sea más sencilla.

Tabla 4-1. Definición de segmentos.

Segmento de línea	Desde nudo	Hasta nudo
0	Red ⁴	R0
1	R0	R1
2	R1	R2
3	R2	R3
4	R3	R11
5	R3	R4
6	R4	R12
7	R12	R13
8	R13	R14
9	R14	R15
10	R4	R5
11	R5	R6
12	R6	R16
13	R6	R7
14	R7	R8
15	R8	R9
16	R9	R17
17	R9	R10
18	R10	R18

4.1.1.1 Definición de las ramas

Conocida la numeración de los segmentos y basándonos en la Tabla 4-1 construimos la Tabla 4-2 dónde se van a detallar y definir las ramas que va a poseer la red del laboratorio que estamos tratando. Separaremos los números con un guion en el caso de existir varios segmentos que componen una misma rama.

⁴ Esto no es un “nudo” definido en la representación gráfica, pero definimos este segmento como el 0, porque más adelante nos va a hacer falta con las transformaciones que vamos a realizar.

Tabla 4-2. Definición de las ramas.

Rama	Segmento de línea
1	0
2	1
3	2-3
4	5
5	10-11
6	13-14-15
7	17
8	18
9	16
10	12
11	6-7-8-9
12	4

4.1.1.2 Definición de los nudos

Una vez definidas las ramas, resulta muy sencillo identificar cuáles son los nudos que se van a tener, ya que van a corresponder con ambos extremos de las ramas definidas en la Tabla 4-2. En la siguiente tabla se va a proceder a reenumerar los nudos, haciéndolos corresponder con la numeración original que se tenía.

Tabla 4-3. Definición de los nudos.

Nudos	Nudo original
1	R0
2	R1
3	R3
4	R4
5	R6
6	R9
7	R10
8	R18
9	R17
10	R16
11	R15
12	R11

4.1.2 Representación gráfica de la red

Partiendo de la red representada por el documento de la CIGRE, que se encuentra en la Figura 3-4 y teniendo en cuenta los elementos definidos en la Sección 4.1.1, se va a observar a continuación una representación gráfica de la red del laboratorio. En esta red tan solo detallaremos los nudos y ramas definidos anteriormente.

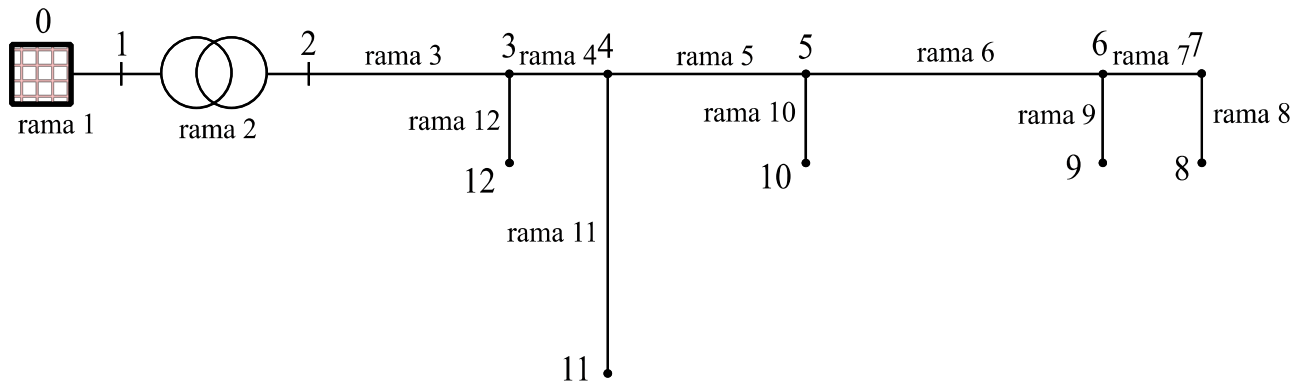


Figura 4-1. Configuración red modelada

Se concluye que la red va a constar de 12 nudos y 12 ramas. A partir de este momento, se nombrará a cada uno de estos elementos según la nueva numeración que le hemos dado, dejando a un lado la nomenclatura utilizada en el documento de la CIGRE.

4.2 Modelado de componentes

La red a escala que se desea diseñar y construir en el laboratorio tiene como primer parámetro de diseño la tensión de trabajo. Esta tensión será de 400 V de línea indistintamente que se hable de AT, MT o BT. Se considerará de aquí en adelante que esta tensión es trifásica perfectamente equilibrada en sus 3 fases.

4.2.1 Alimentación de la red

Van a existir dos posibilidades para la conexión de la red a la red eléctrica. Ambas posibilidades se presentan a continuación junto con sus principales ventajas e inconvenientes:

1. Mediante una fuente de alimentación ideal. Su principal ventaja es que va a proporcionar una tensión trifásica ideal libre de cualquier perturbación. El inconveniente principal es de tipo económico, este tipo de fuentes son muy caras y, además para este tipo de utilización se va a necesitar que sea bidireccional, es decir que sea capaz tanto de ceder como de absorber potencia.
2. Mediante la conexión a la propia red de BT de alimentación de los laboratorios. La ventaja en este caso la encontramos en la evidente disponibilidad inmediata y para cualquier nivel de potencia demandada. Además, también eliminamos el problema de la bidireccionalidad, ya que podemos ceder potencia a la red. El principal inconveniente radica ahora en que la onda de tensión trifásica proporcionada no es perfecta.

Se ha optado por la opción 2 al ser la solución más económica. Sin embargo, durante la realización de este proyecto se obtuvo una fuente ideal que podría funcionar como en el caso de la opción 1.

4.2.2 Transformador

Van a existir, de nuevo, dos posibilidades para modelar el transformador de la red:

1. Utilizar un transformador Dyn11 de relación 1:1 y la potencia nominal que resulte del análisis de las cargas/generación a la que dar suministro.
2. Modelar el transformador como resistencias y reactancias que simulen las 3 fases del transformador.

Se optó inicialmente por la opción 2 por razones económicas. Si bien es cierto, que durante el desarrollo de este proyecto se consiguió comprar un transformador con las características deseadas.

El transformador a considerar se supone con una impedancia de magnetización despreciable (atendiendo a los valores de la Tabla 3-3) y solo se tendrá en cuenta su impedancia serie y su relación de transformación nominal. Con estas consideraciones y suponiendo un transformador trifásico compuesto por 3 monofásicos, el modelo eléctrico que le corresponde se muestra en la Figura 4-2:

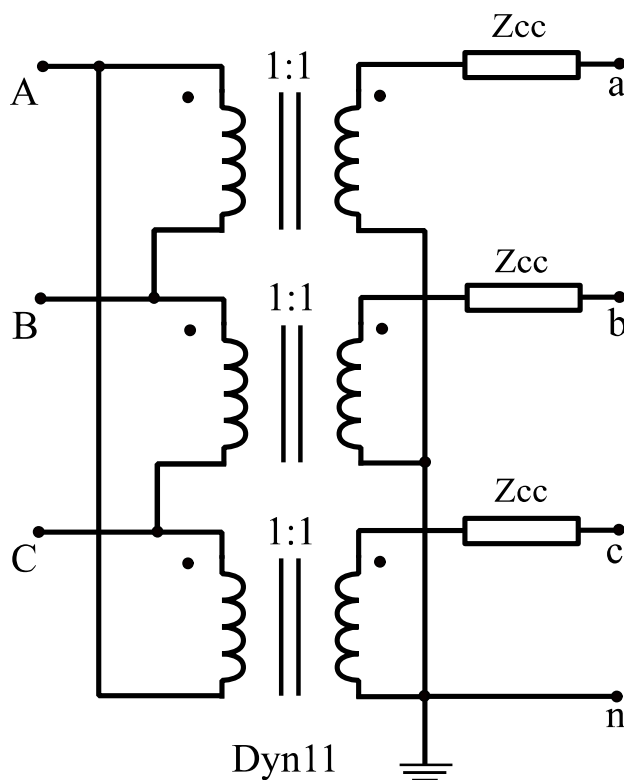


Figura 4-2. Modelo eléctrico transformador (1)

Puesto que la relación de transformación es de $n=1$ ya que la tensión de trabajo se mantiene siempre en 400 V (tanto para MT como para BT) el modelo de la Figura 4-2 es equivalente al de la Figura 4-3.

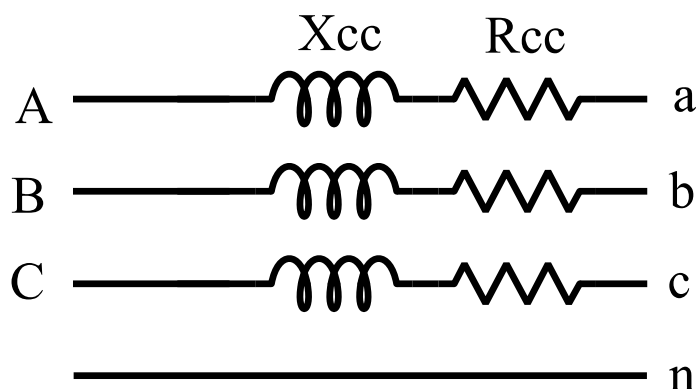


Figura 4-3. Modelo eléctrico transformador (2)

4.2.3 Líneas eléctricas

Para modelar las líneas eléctricas de la red, vamos a despreciar en primer lugar la capacidad y la inductancia paralelo de tal forma que el modelo de la línea quedaría como se muestra en la Figura 4-4.

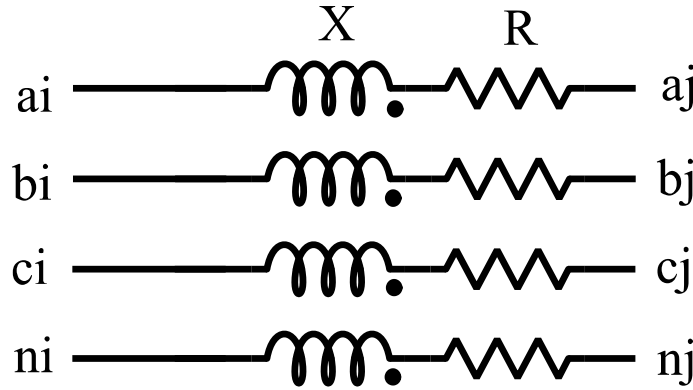


Figura 4-4. Modelo eléctrico de las líneas

Al estar trabajando con circuitos de 4 hilos fabricados con cobre o aluminio y por los que circula una intensidad se produce un fenómeno denominado acoplamiento magnético (representado en las inductancias de la Figura 4-4). Este fenómeno se modela haciendo que las impedancias equivalentes de cada una de las fases estén acopladas magnéticamente, originando tanto una inductancia propia de la línea que estemos estudiando como una mutua de esta línea con el resto de las fases. Todo esto se va a traducir finalmente con una matriz de impedancias del sistema de 4 hilos en la que los elementos no diagonales representan ese acoplamiento entre fases:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ab} & Z_b & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_c & Z_{cn} \\ Z_{an} & Z_{bn} & Z_{cn} & Z_n \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

Ejemplos numéricos de estas impedancias han sido suministrados por la CIGRE tal y como se muestra en la Tabla 3-6. Si bien las impedancias por fase (Z_a, Z_b, Z_c, Z_n) pueden ser replicadas con R y X en serie, no ocurre lo mismo con las de acoplamiento. En la siguiente sección abordaremos su tratamiento.

4.2.3.1 Procedimiento a seguir con los acoplamientos

- **Presentación del problema:** Como hemos visto, la aparición de acoplamiento entre líneas debe tratar como impedancias entre los hilos de las líneas (impedancias de acoplamiento). Se presenta en este punto un problema al ser complicado reproducir en el laboratorio este fenómeno magnético. Aparecerían una serie de impedancias mezcladas entre las fases y el neutro de cada una de las ramas. Esto causaría una red más caótica y desordenada y, como consecuencia, una menor visualización clara de la red a estudiar. Se busca una solución más simple la cual se consigue acudiendo a circuitos equivalentes obtenidos mediante la aplicación de teoría de circuitos.
- **Análisis previos:** La solución diseñada, se basa en el concepto de fuentes dependientes y la traslación de fuentes. Se profundiza en estos dos conceptos e ideas a continuación [5]:
 - Teorema de traslación de fuentes: Se trata de un Teorema que nos va a ser de mucha utilidad en la

solución que se ha planteado. Este teorema, llamado Teorema de traslación de fuentes trata básicamente el desarrollo de una herramienta para reducir circuitos y simplificar su análisis. Consiste en reemplazar una fuente ideal por varias fuentes del mismo valor, cuya ubicación y polaridad se obtienen por simple desplazamiento de la fuente original. El nuevo circuito obtenido, debe ser equivalente al original de tal forma que al resolverlo se obtenga la misma solución. Es necesario añadir, sin embargo, que pese a que la solución final sí que resulta indistinguible para el circuito externo a la fuente, no es posible realizar un análisis real de la propia fuente al verse esta modificada en el procedimiento que hemos realizado. Si queremos analizar la fuente debemos pasar unos pasos atrás y volver al circuito origen dónde se encuentre. A continuación, se va a mostrar un ejemplo de una traslación de fuente ideal de intensidad, ya que es en una fuente de corriente donde se va a aplicar este teorema en este proyecto.

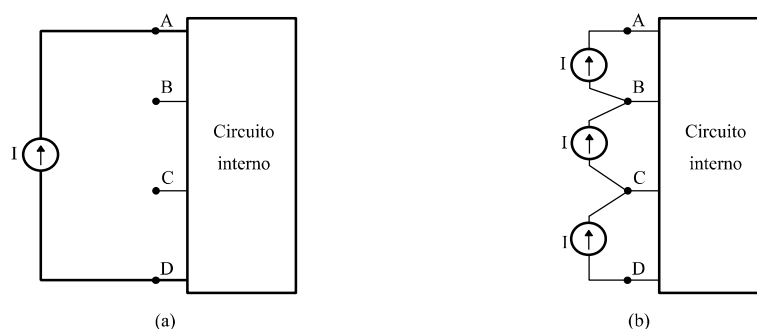


Figura 4-5. Ejemplo traslación fuente de intensidad

En la figura anterior (a) puede observarse un circuito ejemplo con una fuente de intensidad conectada entre los nodos A y D. Esta fuente resulta completamente equivalente a la mostrada en el circuito (b), donde podemos observar 3 fuentes de intensidad con el mismo valor de I que la fuente original. La equivalencia comentada anteriormente se demuestra aplicando la primera ley de Kirchhoff sobre los nudos A, B, C, D de la figura (a) obteniendo exactamente lo mismo que en el caso de aplicar esta ley sobre el circuito de la figura (b). Podemos concluir entonces que ambos circuitos son equivalentes para el circuito interno. En general, dada una fuente ideal de intensidad ésta puede ser sustituida por tantas fuentes como parejas de nudos se encuentren secuencialmente a lo largo de cualquier otro camino alternativo que una sus nudos extremos.

- Fuentes dependientes: A diferencia de las fuentes independientes que en las que su valor de tensión o intensidad se especifica de antemano, las fuentes dependientes tienen determinada su variable de salida (magnitud controlada) en función de otra variable eléctrica (puerta de control). La dependencia entre ambas magnitudes, se suele expresar mediante una función algebraica que define el comportamiento de la fuente. En la práctica suele adoptarse generalmente que esta relación sea lineal para facilitar en gran medida la resolución y el análisis del circuito en cuestión.

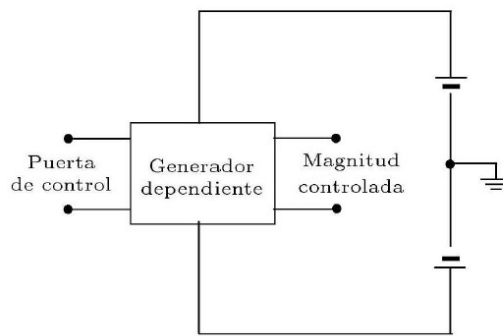


Figura 4-6. Fuente dependiente genérica.

Según lo explicado anteriormente y dado que la magnitud de control y la controlada pueden ser indistintamente una tensión o una intensidad, van a existir 4 tipos de fuentes dependientes:

- Fuentes dependientes de tensión controladas por tensión
- Fuentes dependientes de tensión controladas por intensidad
- Fuentes dependientes de intensidad controladas por tensión
- Fuentes dependientes de intensidad controladas por intensidad

En la solución propuesta a continuación, se va a hacer uso de los dos tipos de fuentes que están controladas por intensidad: tanto la fuente de tensión como la de intensidad. A continuación, se representarán gráficamente estas dos fuentes, al mismo tiempo que se definen las ecuaciones que rigen su funcionamiento.

- Fuente de tensión controlada por intensidad: $v_1(t) = 0$; $v_2(t) = r \cdot i_1(t)$ con $r(\Omega)$

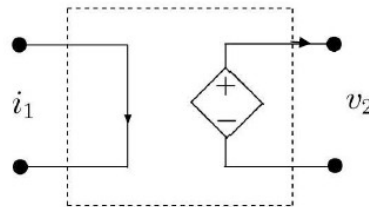


Figura 4-7. Fuente de tensión controlada por intensidad

- Fuente de intensidad controlada por intensidad: $v_1(t) = 0$; $i_2(t) = \beta \cdot i_1(t)$ con $\beta(adim.)$

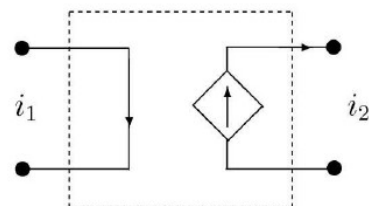


Figura 4-8. Fuente de intensidad controlada por intensidad

4.2.3.2 Solución propuesta

La solución con la que se ha solventado este problema se muestra a continuación.

Sea la matriz de impedancias de una línea de 4 hilos con acoplamientos como la definida en la ecuación (4-1)

Siendo Z_a, Z_b, Z_c, Z_n las impedancias propias de la línea y Z_{ij} ($i = a, b, c, n ; j = a, b, c, n ; i \neq j$), la impedancia de acoplamiento que se produce en la fase i por efecto de j .

En cuanto a los términos diagonales de esta matriz, suele ocurrir que: $Z_a = Z_b = Z_c = Z_p$. Además, en el caso particular de esta red, se cumple que: $Z_n = Z_p$.

En cuanto a los términos no diagonales de esta matriz, también suele ocurrir que estas impedancias de acoplamiento son muy similares, aunque nosotros las consideraremos diferentes, como se observa en la Tabla 3-6. Además, para este caso particular, se realizará la siguiente transformación que nos va a servir más adelante:

$$Z_m = \frac{Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{an}}{3} \quad (4-2)$$

Que será igual en el resto de las fases y el neutro, ya que los términos son idénticos para todos los casos como se puede observar en la Tabla 3-6:

$$Z_m = \frac{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{bn}}{3} = \frac{Z_{ac} + Z_{bc} + Z_{cn}}{3} = \frac{Z_{an} + Z_{bn} + Z_{cn}}{3} \quad (4-3)$$

El vector intensidad es tal que:

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix}, \text{ siendo } I_a + I_b + I_c + I_n = 0 \quad (4-4)$$

Ya que el neutro está aislado de tierra.

Dada la matriz de impedancias y el vector de intensidad las tensiones de los nudos i y j de la red se definen como:

$$U_i = Z \cdot I_{ij} + U_j \quad (4-5)$$

Siendo i y j los nudos extremos de la línea bajo estudio.

A continuación, se opera en esta ecuación, sumando y restando los mismos términos como se indica en (4-6):

$$U_i = Z \cdot I_{ij} + U_j + Z_m \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} - Z_m \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Desarrollando esta expresión y reordenando:

$$\begin{bmatrix} U_{ia} \\ U_{ib} \\ U_{ic} \\ U_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p - Z_m & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ab} & Z_p - Z_m & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_p - Z_m & Z_{cn} \\ Z_{an} & Z_{bn} & Z_{cn} & Z_p - Z_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ja} \\ U_{jb} \\ U_{jc} \\ U_{jn} \end{bmatrix} + Z_m \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

Se agrupará el último término de la ecuación con los productos de las impedancias de acoplamiento con las intensidades, transformándolas en una fuente de tensión dependiente de intensidad (FTDI):

$$\begin{bmatrix} U_{ia} \\ U_{ib} \\ U_{ic} \\ U_{in} \end{bmatrix} = (Z_p - Z_m) \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} FTDI_a \\ FTDI_b \\ FTDI_c \\ FTDI_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ja} \\ U_{jb} \\ U_{jc} \\ U_{jn} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Según esto, las FTDI representan:

$$\begin{aligned} FTDI_a &= Z_{ab} \cdot I_b + Z_{ac} \cdot I_c + Z_{an} \cdot I_n + Z_m \cdot I_a \\ FTDI_b &= Z_{ab} \cdot I_a + Z_{bc} \cdot I_c + Z_{bn} \cdot I_n + Z_m \cdot I_b \\ FTDI_c &= Z_{ac} \cdot I_a + Z_{bc} \cdot I_b + Z_{cn} \cdot I_n + Z_m \cdot I_c \\ FTDI_n &= Z_{an} \cdot I_a + Z_{bn} \cdot I_b + Z_{cn} \cdot I_c + Z_m \cdot I_n \end{aligned} \quad (4-9)$$

Como se puede observar en las ecuaciones (4-9) las fuentes de tensión están controladas por la intensidad I definida en (4-4).

El circuito quedaría de la siguiente forma en cada una de las fases:

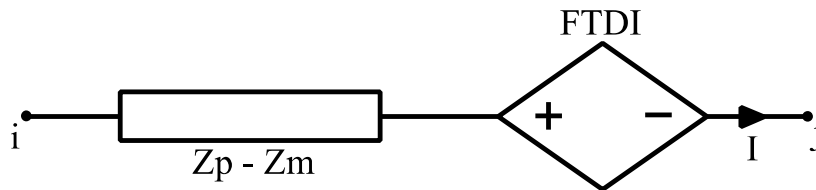


Figura 4-9. Impedancia con FTDI

La FTDI simula la caída de tensión en la fase debida al acoplamiento de las otras fases.

La fuente de tensión se puede transformar en una fuente de intensidad de valor:

$$\begin{aligned} FIDI_a &= \frac{FTDI_a}{Z_p - Z_m} \\ FIDI_b &= \frac{FTDI_b}{Z_p - Z_m} \\ FIDI_c &= \frac{FTDI_c}{Z_p - Z_m} \\ FIDI_n &= \frac{FTDI_n}{Z_p - Z_m} \end{aligned} \quad (4-10)$$

Del mismo modo, estas fuentes de intensidad también están controladas por la I de la ecuación (4-4).

Tras este proceso, obtendremos la matriz de impedancias que multiplicaría al vector de FIDI:

$$\begin{bmatrix} FIDI_a \\ FIDI_b \\ FIDI_c \\ FIDI_n \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_p - Z_m} \cdot \begin{bmatrix} Z_m & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ab} & Z_m & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_m & Z_{cn} \\ Z_{an} & Z_{bn} & Z_{cn} & Z_m \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Haciendo la correspondiente transformación en el circuito, obtendríamos lo siguiente en cada una de las fases:

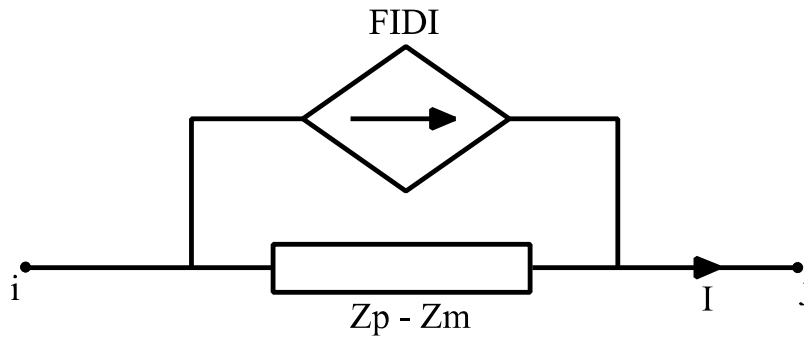


Figura 4-10. Impedancia con FIDI

A continuación, aplicando el teorema de traslación e fuentes convenientemente sobre estas FIDI obtenemos el siguiente resultado para todas las fases (Figura 4-11):

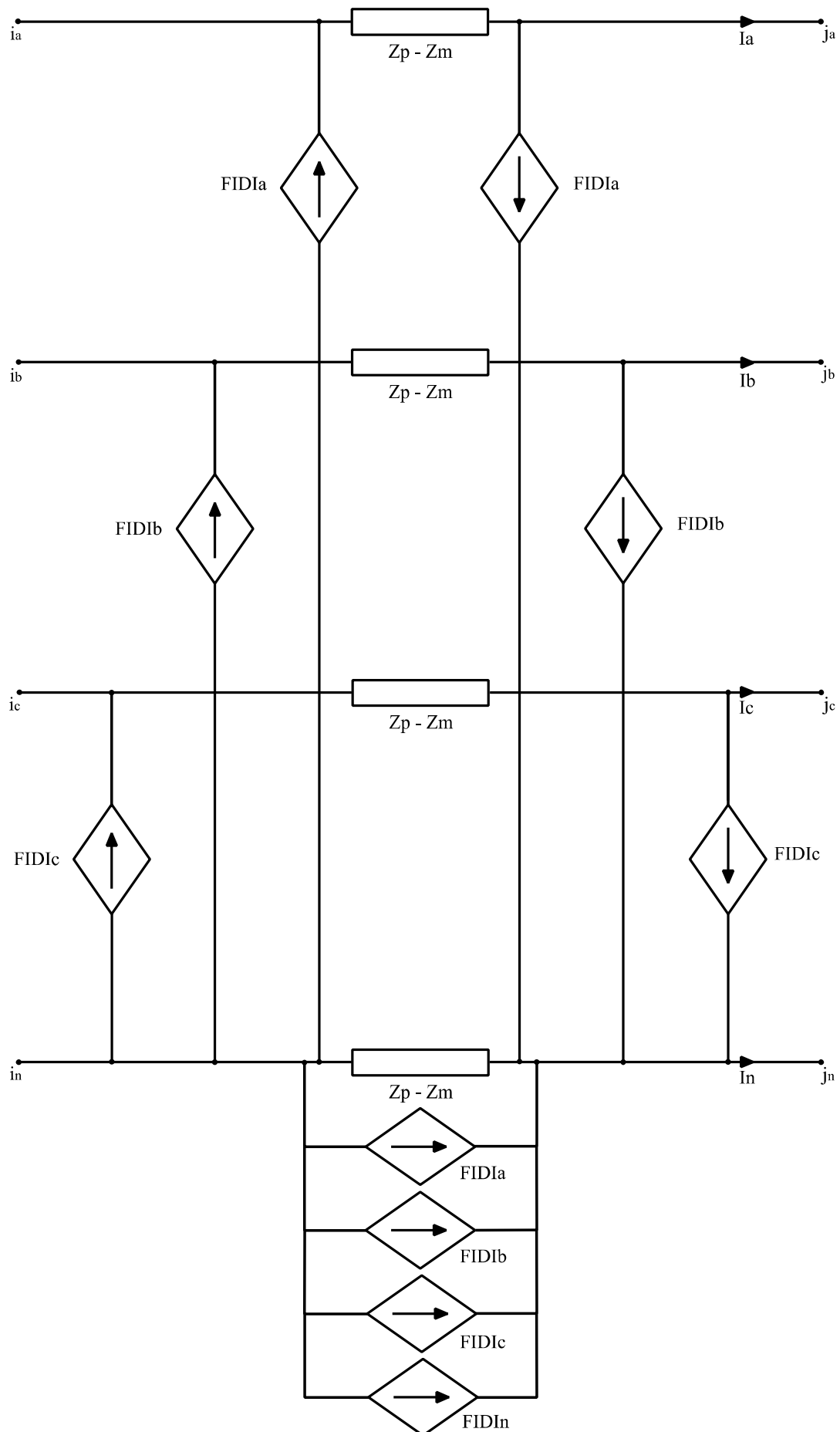


Figura 4-11. Circuito completo con FIDI (1)

Agrupando todas las FIDI del neutro que aparecen en paralelo que llegan al neutro y teniendo en cuenta que estamos trabajando con 3 intensidades trifásicas equilibradas, podemos hacer la siguiente simplificación, teniendo en cuenta lo siguiente:

$$FIDI_a + FIDI_b + FIDI_c + FIDI_n = 0 \quad (4-12)$$

El resultado final se muestra a continuación (Figura 4-12):

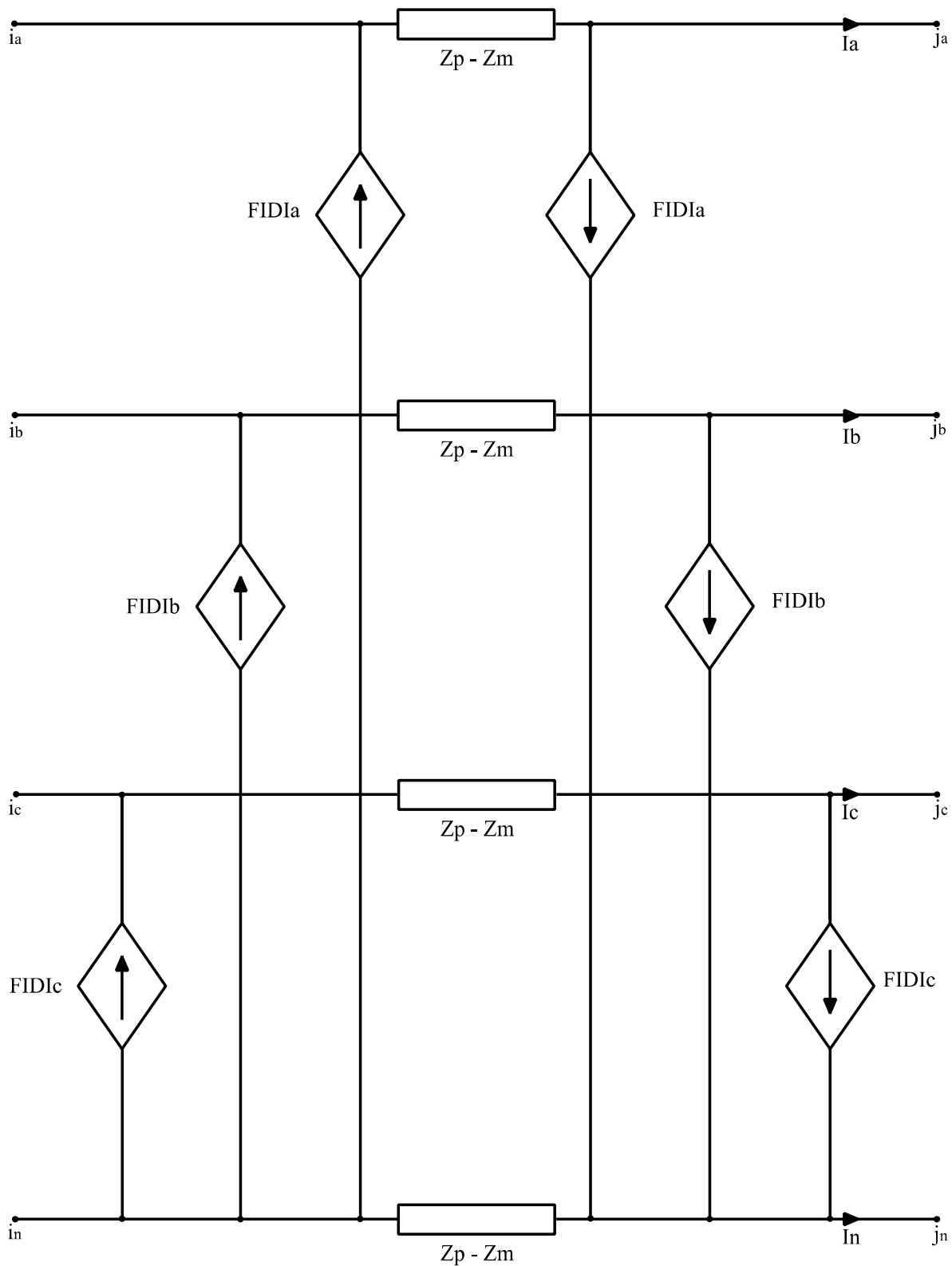


Figura 4-12. Circuito completo con FIDI (2)

Se observa que en el circuito final contiene un total de 6 FIDI que simularán los acoplamientos que sufre cada fase como consecuencia de la circulación de corriente por el resto de ellas.

En todas las transformaciones y traslaciones que se están realizando es muy importante no perder de vista la ubicación de la señal que controla la fuente dependiente correspondiente. Por este motivo, esta se visualiza expresamente en cada una de los casos anteriores (Ver Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11, Figura 4-12).

4.2.4 Puestas a tierra

La puesta a tierra no se considerará en este montaje de la red y se supondrá un sistema TN (neutro del transformador a tierra y neutro de las cargas aislado).

4.3 Parámetros principales

Los nuevos nudos y ramas van a tener diferentes parámetros con respecto a la red principal. Cómo queremos que esta red sea lo más similar posible a la red propuesta por la CIGRE, vamos a basarnos en los datos que hemos definido en el capítulo anterior ajustándolos a las nuevas condiciones de los nudos y las ramas.

4.3.1 Parámetros de las líneas

En el caso de las ramas, debemos basarnos en los datos que aparecen en la Tabla 3-5.

Para las longitudes, simplemente habrá que sumar las longitudes de los segmentos individuales que componen cada rama.

En el caso del tipo de conductor que poseían, observamos que con la nueva definición de ramas podemos mantener los tipos de conductor de cada tramo.

En el caso del tipo de instalación, hay que tener en cuenta que la red del laboratorio va a ser de 4 hilos (3 fases y neutro) por lo que el tipo de instalación será acorde a estas características.

Se mostrará a continuación una tabla resumen con los valores de todos estos parámetros.

Tabla 4-4. Parámetros de las ramas en la red del laboratorio

Rama	Longitud (m)	Tipo de conductor	Instalación
3	70	UG1	3 fases+neutro
4	35	UG1	3 fases+neutro
5	70	UG1	3 fases+neutro
6	105	UG1	3 fases+neutro
7	35	UG1	3 fases+neutro
8	30	UG3	3 fases+neutro
9	30	UG3	3 fases+neutro
10	30	UG3	3 fases+neutro
11	105	UG3	3 fases+neutro
12	30	UG3	3 fases+neutro

En la Tabla 4-4, no se han representado las ramas 1 y 2, que representan la red de conexión y el transformador, ya que no son líneas eléctricas. Se muestra a continuación una figura con el aspecto visual.

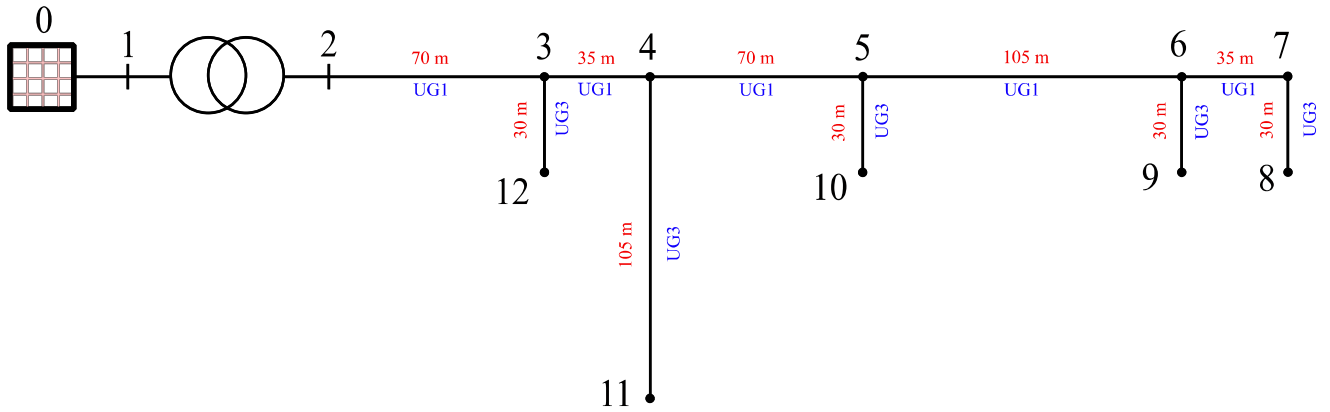


Figura 4-13. Configuración red modelada. Información de las ramas

Una vez detalladas las longitudes y los tipos de conductor podremos obtener fácilmente las impedancias de cada rama.

Como se ha observado en la Figura 4-12, las impedancias de las ramas del circuito quedan reducidas a un valor $Z_p - Z_m$. El valor de esta impedancia va a poder obtenerse a partir de los valores proporcionados de las impedancias de los cables UG1 y UG3 que se están utilizando. Estos valores se encuentran descritos en la Tabla 3-4 y en la Tabla 3-6. También hay que tener en cuenta el dato de la longitud de cada una de las ramas para poder obtener el resultado final en ohmios. Vamos a mostrar a continuación un ejemplo de cómo se calcularía para cada rama. El ejemplo se realiza con la rama 9.

Esta rama tiene el tipo de conductor UG3 y tiene una longitud de 30 m (l_9). Sabiendo que los valores Z_p de esta rama son las diagonales de la matriz y los Z_m se definen según la ecuación (4-3), tenemos para cada fase:

$$Z_p - Z_m = 0.030 \cdot \left(0.871 + j0.797 - \frac{(0.049 + j0.719) + (0.049 + j0.697) + (0.049 + j0.719)}{3} \right) \quad (4-13)$$

$$= 0.0247 + j0.0026 \, \Omega$$

Este valor es el mismo para el resto de las fases al ser iguales las Z_m y Z_p .

La Tabla 4-5 muestra el valor obtenido para cada una de las ramas siguiendo el mismo procedimiento.

Tabla 4-5. Impedancias de las ramas

Rama	$Z_p-Z_m (\Omega)$
3	$0.0113 + j0.0057$
4	$0.0057 + j0.0028$
5	$0.0113 + j0.0057$
6	$0.0170 + j0.0085$
7	$0.0057 + j0.0028$
8	$0.0247 + j0.0026$
9	$0.0247 + j0.0026$
10	$0.0247 + j0.0026$
11	$0.0863 + j0.0090$
12	$0.0247 + j0.0026$

Se observa en la tabla anterior que los tramos con la misma longitud y el mismo tipo de conductor, tienen la misma impedancia.

4.3.2 Parámetros de los nudos: cargas

En el caso de los nudos no tenemos ningún parámetro característico definido anteriormente. El único valor a señalar se trata del valor nominal de las cargas, del factor de potencia y en qué nudo se van a encontrar. Nos basaremos en la información proporcionada en la Tabla 3-7, trasladándola a nuestros nuevos nudos. En la Tabla 4-6 se muestra la información indicada.

Tabla 4-6. Datos de las cargas en la red del laboratorio

Nudo	S (kVA)	Factor de potencia, pf
12	15	0.95
11	52	0.95
10	55	0.95
9	35	0.95
8	47	0.95

Tal y como puede comprobarse en la Figura 4-14, en alguno de los nudos que forman parte de la red a escala de laboratorio, existen una serie de cargas detalladas en la Tabla 4-6.. Para reproducir el comportamiento de estas cargas se propone utilizar estos nudos de la red un convertidor en fuente de tensión (Voltage Source Converter – VSC) que tenga como referencias la potencia activa y reactiva del balance resultante entre las diferentes cargas. Este dispositivo se nombra con el acrónimo OLE (Omnimode Load Emulator) pues en principio podrá establecer cualquier flujo de potencia activa y reactiva en los cuatro cuadrantes, esto es, podremos trabajar con potencias positivas (consumos) y negativas (generaciones).

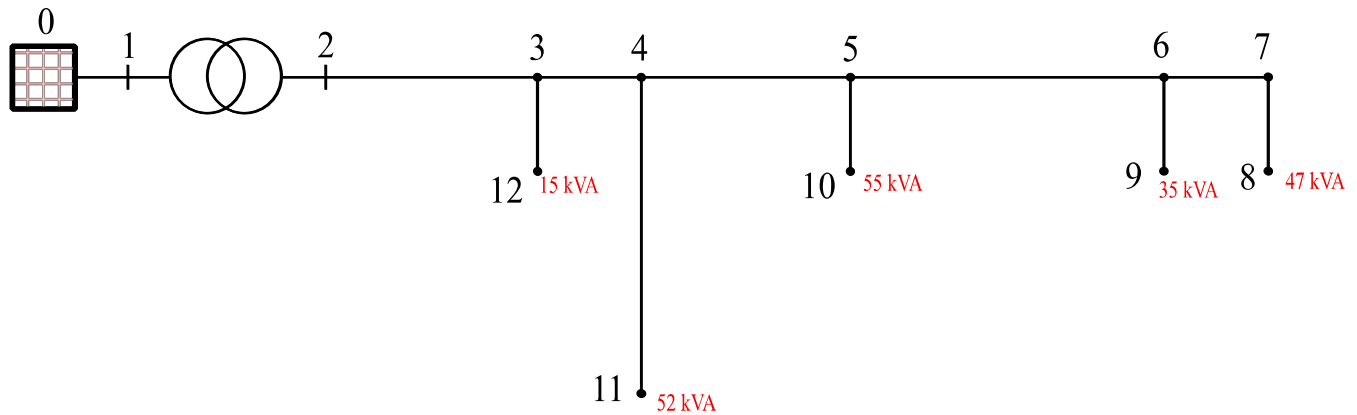


Figura 4-14. Configuración red modelada. Información de los nudos

4.3.3 Parámetros del transformador

En el caso del transformador que se encuentra en la rama 2 de la red, se va a seguir el modelo representado en la Figura 4-3. Los parámetros característicos serán por lo tanto la resistencia y la reactancia serie. Los valores serán los especificados en la Tabla 3-3, que recordemos estaban referidos al lado de baja por lo que no habrá que transformarlos para este modelo.

Tabla 4-7. Parámetros transformador

Desde nudo	Hasta nudo	Grupo de conexión	V1 (kV)	V2 (kV)	R _{cc} (Ω)	X _{cc} (Ω)
1	2	Dyn11	0,4	0,4	0,0032	0,0128

4.4 Factor de escala

Es innegable que en el laboratorio existen una serie de limitaciones a la hora de reproducir las potencias nominales con las que estamos tratando y teniendo en cuenta que se trata de una red de baja tensión. Para adecuar la red a las limitaciones técnicas del laboratorio se propone realizar un cambio de base para escalar la red real. Éste se va a realizar cumpliendo lo siguiente:

- La tensión nominal de 400 V es fácilmente reproducible en el laboratorio por lo que ésta no va a estar afectada por ningún factor de escala.
- Tenemos que adecuar las potencias de todas las cargas a los inversores de los que se dispone. En primer lugar, hay que tener en cuenta que los inversores disponen de una intensidad nominal de 40 A por lo que su potencia nominal:

$$S_{OLE} = 40 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 = 27712.81 \cong 28 \text{ kVA} \quad (4-14)$$

Además se dispone de 5 inversores (uno por cada carga, ver Tabla 4-6) por lo que la potencia total

disponible asciende a:

$$S_{OLE_tot} = 28 \cdot 5 = 140 \text{ kVA} \quad (4-15)$$

En segundo lugar, la suma de todas las potencias nominales de los nudos con carga nos proporciona una potencia total de:

$$S_{cargas_tot} = 204 \text{ kVA} \quad (4-16)$$

Según esto, el factor de escala tiene ser tal que se cumpla la siguiente inecuación:

$$S_{OLE_tot} \geq \frac{S_{cargas_tot}}{FEL} = S_{cargas_tot}^{esc} \quad (4-17)$$

Siendo FEL el valor del factor de escala de la red del laboratorio.

- Por otro lado, queremos mantener las caídas de tensión de la red real en nuestra red escalada por lo que ha de cumplirse lo siguiente:

$$Z \cdot I = Z^{esc} \cdot I^{esc} \quad (4-18)$$

Sustituyendo convenientemente:

$$Z \cdot \frac{S_{cargas_tot}}{\sqrt{3} \cdot 400} = Z^{esc} \cdot \frac{S_{cargas_tot}^{esc}}{\sqrt{3} \cdot 400} \quad (4-19)$$

Y relacionándolo con la expresión del factor de escala para las potencias:

$$Z \cdot S_{cargas_tot} = Z^{esc} \cdot \frac{S_{cargas_tot}}{FEL} \quad (4-20)$$

$$Z \cdot FEL = Z^{esc} \quad (4-21)$$

En el caso de las impedancias, el factor limitante se encuentra en limitaciones comerciales para obtener el valor que queremos. Se establecerá, por lo tanto, un rango de valores entre los que debe estar tanto la resistencia como la reactancia para asegurar estas limitaciones. Observando los valores de las resistencias y las reactancias nos damos cuenta que: R_p - R_m están en el intervalo [0,0057 ; 0,0247] y X_p - X_m están en el intervalo [0,0026 ; 0,009]. Observando los valores de las impedancias comerciales se ha

llegado a la conclusión de que los valores comerciales más pequeños disponibles van a ser los valores máximos de estos intervalos. Estableciendo esta condición se tendría:

$$\begin{aligned} R_p - R_m &\geq 0,0247 \\ X_p - X_m &\geq 0,009 \end{aligned} \quad (4-22)$$

Finalmente, considerando todo lo establecido anteriormente vamos a obtener un valor de FEL a partir del cual se cumple con todas las restricciones expuestas en las ecuaciones (4-17) y (4-22). Realizando los cálculos oportunos, obtenemos que para cumplir todas las restricciones:

$$FEL \geq 5. \quad (4-23)$$

En el caso de nuestra red a escala vamos a seleccionar el valor de $FEL = 6$ por resultar de esta forma unos valores de potencias factibles a considerar

4.5 Componentes reales utilizados en el montaje de la red

En esta sección nos vamos a encargar de definir los componentes reales que se han utilizado para construir la red del laboratorio, proporcionando en la medida de lo posible, todos sus datos y parámetros específicos.



Figura 4-15. Fotografía red laboratorio

4.5.1 Transformador

- a) Solución con transformador



Figura 4-16. Fotografía transformador (1)

El transformador seleccionado para esta red ha sido suministrado por la empresa Clarkia [6]. Se trata de un transformador trifásico seco de 400/400 V. Va a constar de las características que se detallan la tabla a continuación.

Tabla 4-8. Características transformador 400/400 V

Magnitud	Descripción
Tensión primario (V)	380-390-400-410-420
Tensión secundario (V)	400
Potencia (kVA)	125
Frecuencia (Hz)	50
Intensidad (A)	180
Pérdidas (W)	640/1750 ⁵
Tensión de cortocircuito (%)	4
Refrigeración	Aire
Conexión	Dyn11
Estándares	UNE-EN 60076-1
Temperatura clase	B

⁵ Pérdidas del ensayo de vacío/Pérdidas del ensayo de corto

Clase de aislamiento	H ⁶
Protección	IP23

Este transformador no va a modificar el nivel de tensión proveniente de la red de BT, sin embargo, va a evitar que lleguen a la red posibles armónicos, conectándolo en Dyn11. Asimismo hay que tener en cuenta que la impedancia equivalente del transformador debe coincidir con la seleccionada en la Tabla 3-3.



Figura 4-17. Fotografía transformador (2)

⁶ Temperatura máxima de 180 °C.



Figura 4-18. Fotografía transformador (3)

- b) Solución con modelo equivalente de la impedancia serie. Esta es la solución aplicada finalmente, como se comentó anteriormente. Los valores de las impedancias se muestran en la Tabla 4-7.

4.5.2 Impedancias de las ramas: Resistencias y reactancias

Ya se obtuvieron las impedancias de cada rama en la Tabla 4-5. Sin embargo, éstas impedancias no son las que estamos buscando reproducir en el laboratorio, ya que no hay que olvidar el factor de escala tratado en la Sección 4.4. Como se demostró en la ecuación (4-21), para obtener las Z^{esc} es necesario multiplicar todos estos valores por el FEL. Actualizamos entonces los valores en la siguiente tabla.

Tabla 4-9. Impedancias escaladas de las ramas

Rama	$Z_p-Z_m (\Omega)$
2	$0.0192 + j0.0768$
3	$0.0680 + j0.0342$
4	$0.0340 + j0.0171$
5	$0.0680 + j0.0342$
6	$0.1021 + j0.0512$
7	$0.0340 + j0.0171$
8	$0.1480 + j0.0154$
9	$0.1480 + j0.0154$
10	$0.1480 + j0.0154$
11	$0.5179 + j0.0538$
12	$0.1480 + j0.0154$

Una vez obtenido el valor deseado para cada una de las resistencias y reactancias de cada rama, vamos a proceder

a detallar cuales son las que existen actualmente en el laboratorio.

- **Resistencias:** Las resistencias proporcionadas se corresponden con el valor dado en la parte real de la segunda columna de la Tabla 4-9. Van a ser proporcionadas por INELEC, [7]. Asimismo, cada resistencia va ser de un fabricante distinto ya que necesitamos valores muy precisos. Los fabricantes que han proporcionado las resistencias son Arcol [8] y Ohmite [9]. Además también se han adquirido disipadores de Fischer [10]. A continuación, se muestra una tabla resumen con toda la información.

Tabla 4-10. Resistencias de cada rama

Rama	Resistencia (Ω)	Resistencia propia (Ω)	Disposición	Marca	Modelo
2	0.0192	0.04	2 paralelo	Ohmite	PFE/2
3	0.0680	0.14	2 paralelo	Ohmite	PFE/5
4	0.0340	0.07	2 paralelo	Ohmite	PFE/3
5	0.0680	0.14	2 paralelo	Ohmite	PFE/5
6	0.1021	0.1	1	Ohmite	PFE/5
7	0.0340	0.033	1	Ohmite	PFE/2
8	0.1480	0.15	1	Arcol	HS300 R15 F
9	0.1480	0.15	1	Arcol	HS200 R15 F
10	0.1480	0.15	1	Arcol	HS300 R15 F
11	0.5179	1	2 paralelo	Arcol	HS300 R15 F
12	0.1480	0.15	1	Arcol	HS25 R15 F



Figura 4-19. Fotografía resistencias (1). HS200

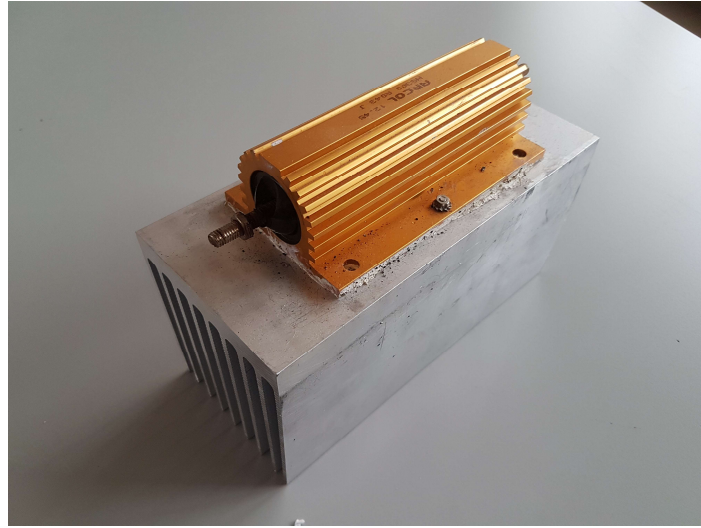


Figura 4-20. Fotografía resistencias (2). HS300+disipador



Figura 4-21. Fotografía resistencias (3)

- Reactancias: Para este caso, antes que nada, vamos a transformar las reactancias en inductancias, ya que es el valor que nos va a pedir el proveedor para la compra. Teniendo en cuenta que $X = 2\pi L$, obtenemos los valores de L .

Tabla 4-11. Inductancias de cada rama

Rama	Reactancia (Ω)	Inductancia (mH)
2	0.0768	0.2445
3	0.0342	0.1087
4	0.0171	0.0544
5	0.0342	0.1087
6	0.0512	0.1631
7	0.0171	0.0544
8	0.0154	0.0489
9	0.0154	0.0489
10	0.0154	0.0489
11	0.0538	0.1711
12	0.0154	0.0489

Vistas las inductancias necesitadas, estas se proporcionaron por la empresa Clarkia [6], con el valor mostrado en la segunda columna de la Tabla 4-11 y con las siguientes características.

Tabla 4-12. Propiedades inductancias

Parámetro	Descripción
Tipo	Inductancia monofásica
Ejecución	Resina de poliéster impregnado al vacío
Frecuencia	50 Hz
Refrigeración	Natural aire
Tensión	400 V
Clase de aislamiento	H
Protección	IP 00
Servicio	Continuo
Altitud	<1000 Mt
Sobre temperatura	F
Nivel de aislamiento	3x60
Temperatura ambiente	40 °C
Nivel de ruido	<60 dB



Figura 4-22. Fotografía inductancias



Figura 4-23. Fotografía inductancias (2). Detalle del montaje

En la siguiente tabla mostraremos las intensidades nominales, así como las dimensiones y el peso de las inductancias seleccionadas.

Tabla 4-13. Dimensiones inductancias

Inductancia (mH)	Intensidad nominal	Dimensiones (WxDxH)	Peso (kg)
0.2445	167,06	180x190x175	17
0.1087	175,92	150x130x150	10,8
0.0544	156,07	108x110x110	4,9
0.1087	119,79	108x120x110	5,6
0.1631	75,2	108x100x110	4,1
0.0544	44,05	75x80x80	1,2
0.0489	44,05	75x75x80	1,1
0.0489	31,15	75x75x80	0,9
0.0489	44,59	75x75x80	1
0.1711	46,61	97x90x100	2,6
0.0489	9,62	75x75x80	1



Figura 4-24. Fotografía montaje impedancias (1)

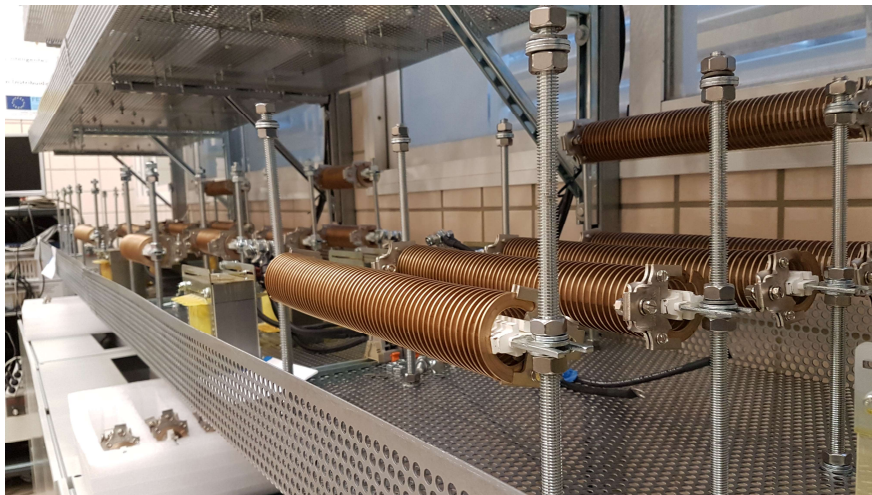


Figura 4-25. Fotografía montaje impedancias (2)



Figura 4-26. Fotografía montaje impedancia (3)

4.5.3 Emuladores de carga y acoplamientos de líneas: OLE

Para los niveles de tensión y potencia que se están poniendo en juego en esta red de distribución a escala resulta conveniente utilizar un inversor de dos niveles con la topología mostrada en la Figura 4-27.

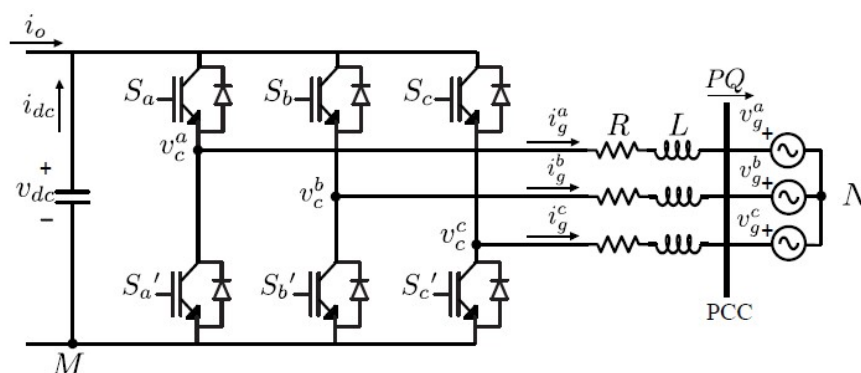


Figura 4-27. VSC de dos niveles



Figura 4-28. Fotografía OLE (1)

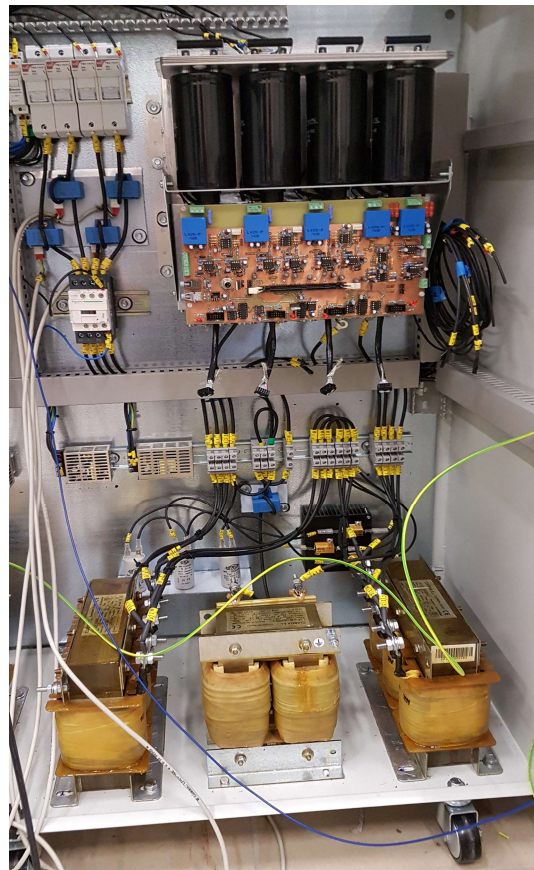


Figura 4-29. Fotografía OLE (2)

Tal y como puede comprobarse, el VSC se conecta a la red mediante la utilización de un filtro de acoplamiento. Habitualmente, se utiliza un filtro puramente inductivo para filtrar las intensidades que salen hacia la red. Sin embargo, este tipo de filtro plantea el inconveniente de necesitar un valor elevado de intensidad para reducir al máximo la intensidad armónica emitida a la red. Por este motivo, y para este caso en particular en el que sí poseemos intensidades bajas, para minimizar el contenido armónico se pueden utilizar filtros de conexión LCL. La principal ventaja de este filtro es que se consiguen unos buenos resultados de filtrado con inductancia baja debido a que los armónicos de corrientes se derivan por el condensador.

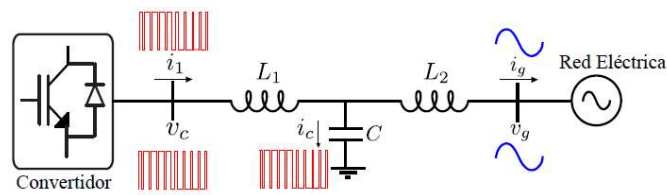


Figura 4-30. Filtro LCL

No obstante, estos filtros presentan como principal inconveniente la introducción de una resonancia que hay que tener en cuenta en el algoritmo de control de corriente para no hacer el sistema inestable. Esta resonancia se puede apreciar en la función de transferencia entre la intensidad inyectada a la red y la tensión generada por el convertidor tal y como se muestra en la Figura 4-31. Como puede comprobarse, el filtro LCL consigue una mayor atenuación que el filtro L para la misma inductancia total. La frecuencia de resonancia se fija mediante una adecuada selección de los valores de inductancia y capacidad del filtro. En este sentido, es importante tener en cuenta dos aspectos. Por una parte, la resonancia debe situarse lejos de la frecuencia de conmutación del convertidor para conseguir la máxima atenuación posible. Por otra parte, la frecuencia de resonancia debe estar coordinada con el ancho de banda del control de corriente para evitar inestabilidades del sistema.

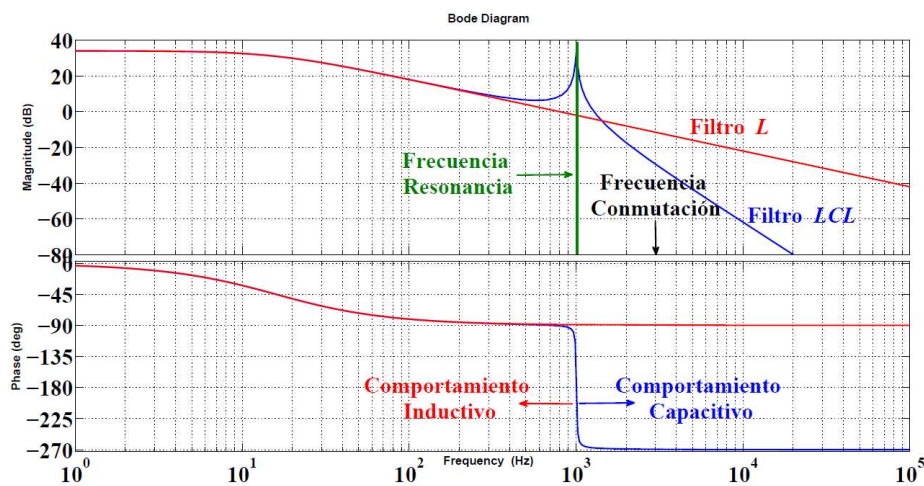


Figura 4-31. Diagrama de bode a la intensidad inyectada frente a la tensión del VSC.

Teniendo estas consideraciones presentes, la muestra los valores de diseño del VSC que se utilizará en la red del laboratorio.

Tabla 4-14. Parámetros de los VSC

Parámetro	Valor
Tensión nominal AC (V)	400
Intensidad nominal (A)	40
Tensión nominal DC (V)	750
Tipo de conexión	Trifásico
Frecuencia de conmutación	10 kHz
Reactancia de conexión lado de red (L_1)	2.5mH
Reactancia de conexión lado de convertidor (L_2)	2.5mH
Condensador filtrado (C)	1 μ F

La función de estos VSC va a ser doble. Por un lado van a emular las cargas de los nudos correspondientes, pero por otra parte, también van a ser los encargados de suministrar la intensidad de los acoplamientos representados por las FIDI desarrolladas en la Sección 4.2.3. Obsérvese en la Figura 4-12 que cada línea ij tendría en cada fase a, b, c y en ambos extremos una FIDI. Se necesitaría por lo tanto un OLE en cada uno de los extremos de cada línea. Si tenemos 11 líneas con acoplamientos se necesitarían 22 OLEs trifásicos en total para simular convenientemente los acoplamientos de cada línea. Este número es posible reducirlo si se agrupan las FIDI que llegan al mismo nudo, con lo que se conseguiría pasar de 22 a 11 OLEs en total. Más adelante se verá como este número se ha reducido aún más por motivos económicos y se justificará convenientemente.

5 VALIDACIÓN TEÓRICA DE LA RED A ESCALA PARA CONSUMOS EQUILIBRADOS

Una vez definidos todos los elementos que componen nuestra red de laboratorio (o red a escala), vamos a proceder a validar su funcionamiento. La forma de proceder será realizando una validación teórica de la red, en la que compararemos los resultados de la red exacta con la red que hemos modelado posteriormente, ambos con un perfil de consumo equilibrado. Analizando esta comparación, podremos sacar resultados que nos ayudarán a comprender mejor la red y a obtener conclusiones en cuanto a si las simplificaciones realizadas resultan admisibles o no.

5.1 Consideraciones previas

5.1.1 Herramienta MATLAB

Para realizar este análisis teórico se ha decidido hacer una simulación de la red a escala. Para ello se ha utilizado la herramienta MATLAB [11]. Se trata de una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Esta herramienta nos permitirá comprobar gráficamente los resultados que vamos obteniendo y exportar los resultados a una hoja Excel.

5.1.2 Método de barrido del árbol

Para realizar un estudio completo de la red de laboratorio, va a ser necesario hacer un análisis exhaustivo de la misma. Para ello y conociendo la tensión del nudo de cabecera, que va a ser de 400 V, así como los valores de las cargas vamos a realizar un reparto de cargas.

Al tratarse de una red radial, el método más sencillo para hacer el reparto de carga es el método del barrido del árbol [12]. La implantación de este método en este tipo de redes más simples que las malladas permite la utilización de algoritmos matemáticos más sencillos que aprovechan la estructura arborescente de la red para disminuir los tiempos de cálculo,

Este método consiste en realizar barridos aguas arriba (obteniendo las intensidades) y aguas abajo (actualizando tensiones) de forma iterativa hasta conseguir un error en tensiones que consideremos admisible.

A continuación, se detallan las ecuaciones que se utilizan para este método, en la iteración k :

Considérese una red radial cuyos n nudos se ordenan desde el punto de alimentación hasta los nudos más extremos de modo que cada nudo precede a los que tiene aguas abajo. Partiendo de perfil plano, U^0 , el proceso de solución consta de 3 etapas que se repiten iterativamente hasta que las tensiones en dos iteraciones sucesivas

sean lo suficientemente parecidas:

En primer lugar, se obtienen las intensidades netas inyectadas en cada nudo.

$$I_i^k = (S_i/U_i^k)^* - Y_i \cdot U_i^k \quad ; \quad i = n, \dots, 2 \quad (5-1)$$

En segundo lugar, se barren las ramas del árbol aguas arriba, calculando las intensidades que circulan por las ramas utilizando la primera ley de Kirchhoff.

$$I_{ij}^k = -I_j^k + \sum_{m \in j, m \neq i} I_{jm}^k \quad ; \quad j = n, \dots, 2 \quad (5-2)$$

Lo siguiente, es actualizar las tensiones, barriendo aguas abajo y utilizando la segunda ley de Kirchhoff.

$$U_j^{k+1} = U_i^{k+1} - Z_{ij} \cdot I_{ij}^k \quad ; \quad j = 2, \dots, n \quad (5-3)$$

Siendo Z_{ij} la impedancia serie de la línea i-j.

El proceso va a finalizar cuando se cumpla una condición de convergencia, cuando el error sea menor que una tolerancia. En este caso vamos a usar la diferencia de tensiones en todos los nudos entre la iteración k y la k-1:

$$|U_i^{k+1} - U_i^k| \leq \varepsilon \quad (5-4)$$

5.2 Redes a estudiar

En primer lugar, vamos a definir las redes que vamos a simular. La idea de simular varias redes se debe a que queremos comprobar que error se tiene en la red comparándola con la real, en el caso de añadir una serie de simplificaciones. Estas simplificaciones no son con otra intención más que hacer la red lo más económica y práctica posible, al mismo tiempo que su análisis se facilita. Por otro lado, dentro de estas simplificaciones también encontraremos limitaciones propias de los elementos que la componen, como pueden ser tensiones o intensidades máximas soportadas por los componentes.

Estas simplificaciones van a traducirse en que los resultados de las redes se alejen cada vez más de ser similares, cada vez que añadimos algunas de estas restricciones a nuestra red de laboratorio. El objetivo entonces consistirá en determinar si estos errores son admisibles o no en el funcionamiento de nuestra red real.

5.2.1 Red exacta

Esta red va a intentar parecerse lo más posible a la red de baja tensión europea benchmark detallada en el documento de la CIGRE.

Le aplicaremos el factor de escala explicado en la Sección 4.4. Esta red contendrá los acoplamientos típicos de este tipo de redes, por lo que la matriz de impedancias será 4×4 tal y como la de la ecuación (4-1).

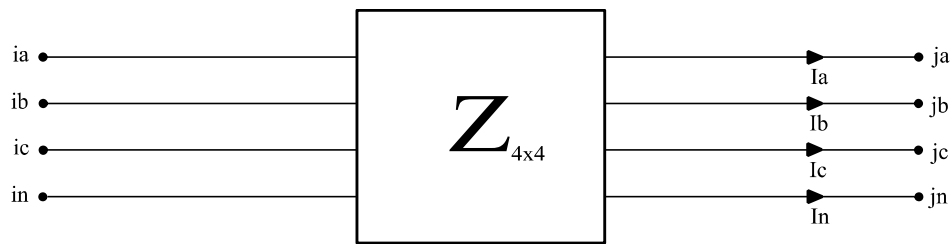


Figura 5-1. Representación rama circuito exacto

5.2.2 Red con las FIDI

Con esta segunda red vamos a tratar de replicar exactamente el mismo funcionamiento que con la red exacta, pero eliminando los acoplamientos y sustituyéndolos por las FIDI. Incluso las FIDI del neutro que eliminamos según la ecuación (4-12), serán añadidas en este circuito, para ser fieles a la reproducción exacta del circuito exacto.

Recordemos que la red quedaría tal y como se muestra en la Figura 4-11.

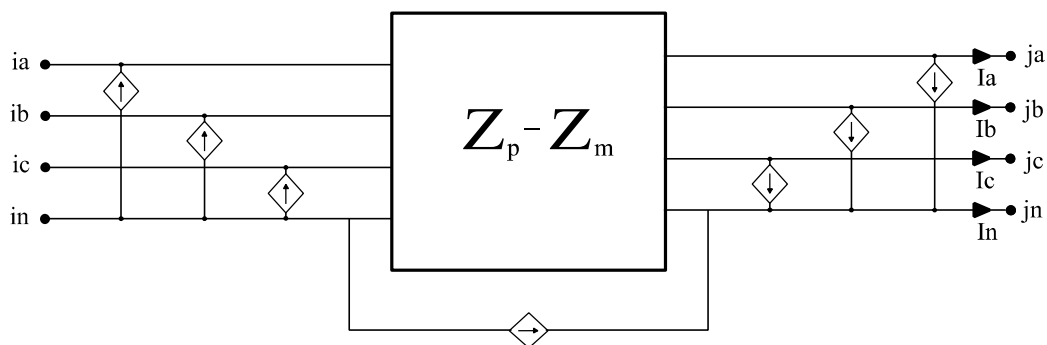


Figura 5-2. Representación rama circuito con FIDI

5.2.3 Red real del laboratorio

Esta red va a partir de la red de las FIDI explicada en la sección anterior. A partir de aquí, la red sufrirá una serie de modificaciones.

5.2.3.1 Simplificación de FIDI

En primer lugar, eliminaremos las FIDI del neutro, cumpliendo la ecuación (4-12), debido a que al ser las intensidades equilibradas y ser una suma de todas las FIDI que llegan al neutro, esta suma es nula para neutros aislados.

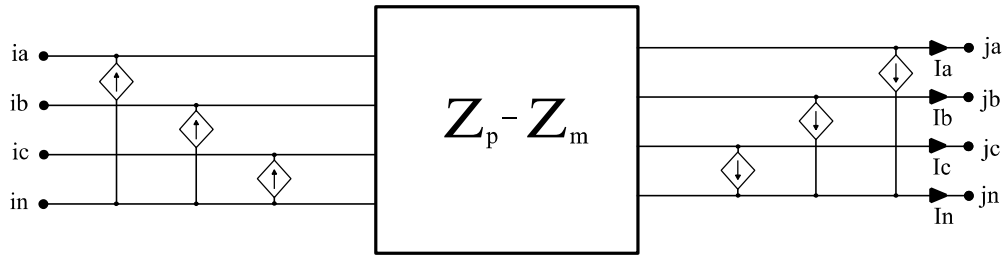


Figura 5-3. Representación rama circuito laboratorio

Recordemos que, en cada uno de los nudos de las ramas, van a converger una serie de FIDI provenientes de todas las ramas que se unan en el nudo en cuestión. Estas FIDI, se sumarán en una FIDI equivalente en cada nudo, (que podrá ser negativa o positiva indistintamente) que representará globalmente el valor de los acoplamientos en el nudo en cuestión. De esta forma, de cada uno de los nudos partirá una sola FIDI (una de cada fase, evidentemente). En las figuras a continuación se explica un ejemplo de este procedimiento en una de las partes del circuito con unos nudos ejemplo i, k, j, l. En la Figura 5-4 y la Figura 5-5, tan solo se ha representado la forma de proceder con la fase “a” del circuito (sería análogo para el resto de las fases) ni tampoco las impedancias propias de cada rama, con el objetivo de que no quede tan sobrecargado y pueda observarse claramente lo que aquí se detalla. Se observa que en el nudo “k” convergen 3 FIDI diferentes provenientes de la traslación de fuentes de las ramas “ik”, “kj” y “kl”. Sumando estas 3 FIDI obtenemos lo representado en la Figura 5-5, donde tan solo tenemos una única fuente en el nudo “k”. Se ha decidido poner esta fuente entrante en la fase, aunque esta suma puede ser positiva (entrante) o negativa (sería saliendo de la fase en este caso) indistintamente. Del mismo modo se ha procedido con el resto de nudos, suponiendo que el circuito de alrededor de este detalle de 3 ramas, también va a contribuir en la traslación de fuentes originándose FIDI que no están representadas en la Figura 5-4.

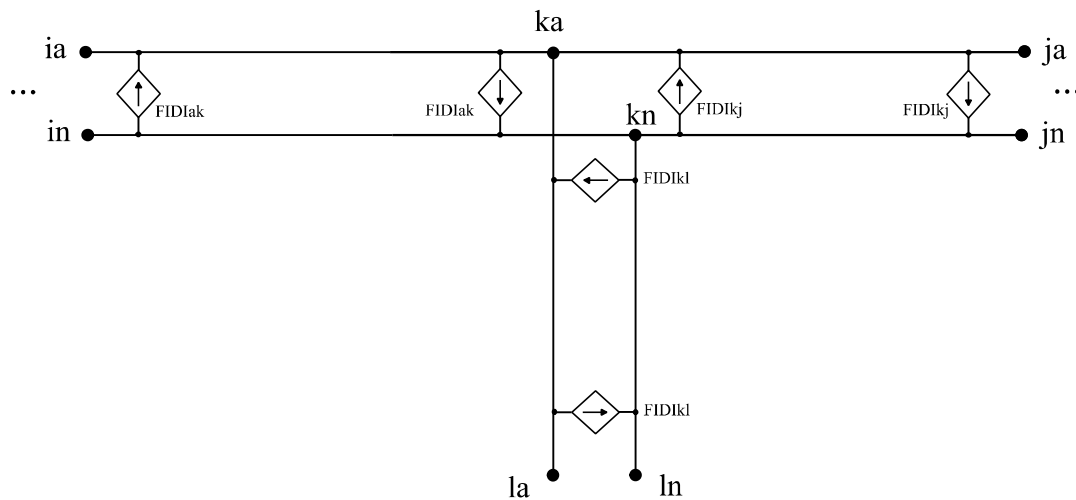


Figura 5-4. Detalle de FIDI equivalente (1)

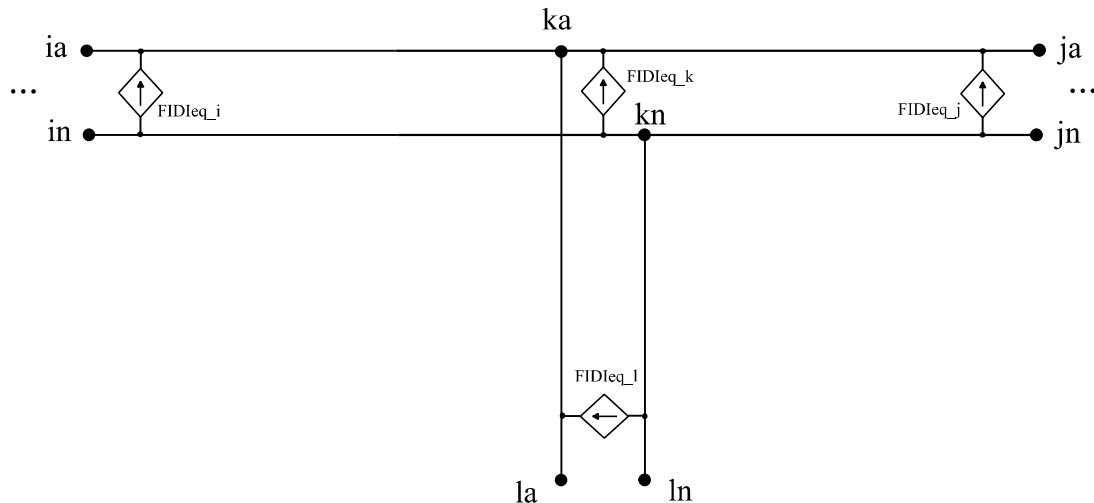


Figura 5-5. Detalle de FIDI equivalente (2)

La siguiente simplificación va a constar en eliminar algunas FIDI menos relevantes. Recordamos en este punto que la red posee un total de 6 inversores (o OLE). Los 5 primeros, se encuentran en los nudos de las cargas y el sexto se encuentra en el nudo 2. Estos inversores van a ser los encargados de proporcionar el valor de la intensidad que obtengamos en cada FIDI equivalente, además de la intensidad que necesite la carga en cuestión (en el caso de los nudos con carga). Por este motivo, los nudos que no tienen inversor no van a poder proporcionar la intensidad de la FIDI equivalente en ese nudo. Nos estamos refiriendo a los nudos 3,4,5,6,7. Se ha decidido poner el inversor del nudo 2 ya que al ser el nudo de cabecera y llevar la rama tanta intensidad, el valor de la FIDI no va a ser ni mucho menos despreciable. En este punto surgen un par de preguntas: ¿es esta simplificación asumible en el sentido de que los valores que vamos a obtener sean realistas (errores pequeños) ?, ¿es necesario tener un inversor en cada nudo o este ahorro económico es justificable? Ambas preguntas y otras que hayan podido surgir, se van a responder más adelante demostrándolas con valores numéricos reales de la red.

5.2.3.2 Limitaciones de intensidad

Otra de las diferencias que va a tener esta red del laboratorio, es debida a las limitaciones de intensidad existentes en los diferentes elementos que constituyen la red real, es decir, los que se detallaron en la Sección 4.5. Por este motivo nos vamos a encontrar dos límites distintos:

- Límite de intensidades mínimas que pueden circular. Este límite lo va a poner únicamente el convertidor. Se ha comprobado que para intensidades menores de 5 A el convertidor introduce una cantidad de armónicos en la red que no son admisibles en los ensayos que queremos realizar. Por este motivo, las intensidades menores que ésta van a tener que ser tratadas con especial cuidado. Tendremos dos opciones: anular todas las intensidades que sean menores que 5 A o hacer todas las intensidades menores igual a 5 A modificando la curva de carga convenientemente.
- Límite de intensidades máximas que pueden circular. Este límite puede ser impuesto por dos elementos diferentes: la línea o el convertidor. En el caso de la línea, el límite se debe a la intensidad máxima que pueden soportar elementos como las resistencias o inductancias para no deteriorarse en la utilización. El otro caso, el del convertidor, se debe a la intensidad máxima que este puede aportar que, recordemos, es de 40 A. A continuación, se muestra una tabla con los límites de intensidad de cada rama con carga y quién limita cada rama.

Tabla 5-1. Límites intensidades máximas

Rama	Límite I _{max} (A)	¿Qué limita?
8	40	Convertidor
9	35	Línea
10	40	Convertidor
11	30	Línea
12	13	Línea

Un caso diferente se da en el nudo 2. Recordemos que este nudo también dispone de un inversor para suministrar la intensidad proveniente de la FIDI del tramo de la línea 2-3 que incide en este nudo, ya que ésta va a tener valores significativos que no van a poder ser despreciados. La limitación de este nudo será por lo tanto la del inversor del que dispone, no pudiendo ser mayor de 40 A.

En cuanto al resto de rama que no tienen carga, se puede afirmar que las intensidades máximas son lo suficientemente grandes como para no tener problemas con las cargas que estamos tratando.

En la Figura 5-6 se muestra una representación de la red con las intensidades máximas que estamos tratando en cada rama.

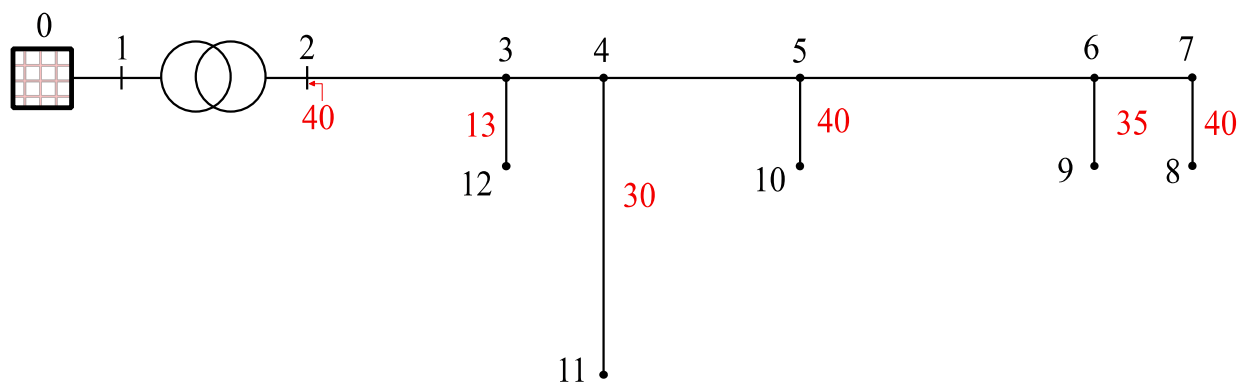


Figura 5-6. Representación de la red con las intensidades máximas

5.3 Simulaciones

Una vez definidos en detalle todas las redes que vamos a estudiar, vamos a proceder a realizar una breve explicación de las simulaciones que se han realizado para realizar la validación teórica.

5.3.1 Redistribución de las cargas

Observando y comparando la Figura 4-14 con la Figura 5-6, nos damos cuenta de que las cargas más grandes no se corresponden con la rama con más intensidad máxima admisible. Esto en principio no debería suponer un problema, aunque si estuviesen en otra posición habría un mejor aprovechamiento de la línea en cuestión, ya que en el momento que superemos la intensidad vamos a tener que ir bajando la carga.

Aparte de este detalle del aprovechamiento de la línea, el principal motivo que ha llevado a la redistribución de las cargas es la simulación de desequilibrios algo más significativos. En estos casos, hay una fase que va a quedar tan sobrecargada que en la mayoría de los casos se va a superar esta intensidad máxima llevando inevitablemente a bajar la carga hasta que la intensidad se ajuste a la deseada. La principal consecuencia de esto, es que la carga

va a quedar cada vez más igualada en todo el perfil de consumo diario, produciéndose cargas prácticamente planas en el consumo de un día. Evidentemente, este comportamiento se está alejando mucho de la realidad actual, ya que se conoce que esta curva de demanda diaria sufre variaciones en determinadas horas del día debido al estilo de vida del ser humano.

Una solución parcial a este inconveniente (aunque no se soluciona el problema por completo) es colocar las cargas mayores junto con las ramas que soportan más intensidad y viceversa con las cargas más pequeñas. De esta forma conseguimos ordenar las cargas de forma diferente.

Otro detalle a modificar, es la carga que se encuentra en el nudo 12, de tan solo 15 kVA. Comparada con las otras esta carga es prácticamente despreciable. Se va a demostrar a continuación que esta carga ni siquiera va a aparecer en la simulación en el caso de quedarse en ese valor.

Suponiendo que nos encontramos en el caso equilibrado y teniendo en cuenta el FEL, vamos a obtener la intensidad que tendríamos cuando la carga estuviera al 100 %:

$$I_{12} = \frac{S_{12}/FEL}{U \cdot \sqrt{3}} = \frac{15 \cdot 10^3 / 6}{400 \cdot \sqrt{3}} = 3,608 \text{ A}$$

Se observa que la intensidad máxima que va a tener esta carga va a ser menor que la intensidad mínima que podemos obtener de los inversores. Por este motivo se igualará siempre a 5 A y esta carga siempre estaría dando la misma potencia de forma constante. Este comportamiento plano es el que queremos evitar a toda costa como se ha detallado en párrafos anteriores.

Ante esta situación se ha tomado la decisión de duplicar esta carga para que si se produzca variación durante el consumo diario. No se ha decidido aumentarla más por un motivo principal: esta carga tiene un gran impedimento de encontrarse en una rama que solo soporta como intensidad máxima 13 A un valor muy bajo y alejado de los del resto de las ramas, por lo que tampoco conviene que sea muy alto.

Teniendo en cuenta todo lo expuesto en párrafos anteriores la distribución de cargas quedaría ahora de la siguiente forma.

Tabla 5-2. Redistribución de cargas

Rama	Límite Imax (A)	S (kVA)
8	40	52
9	35	47
10	40	55
11	30	35
12	13	30

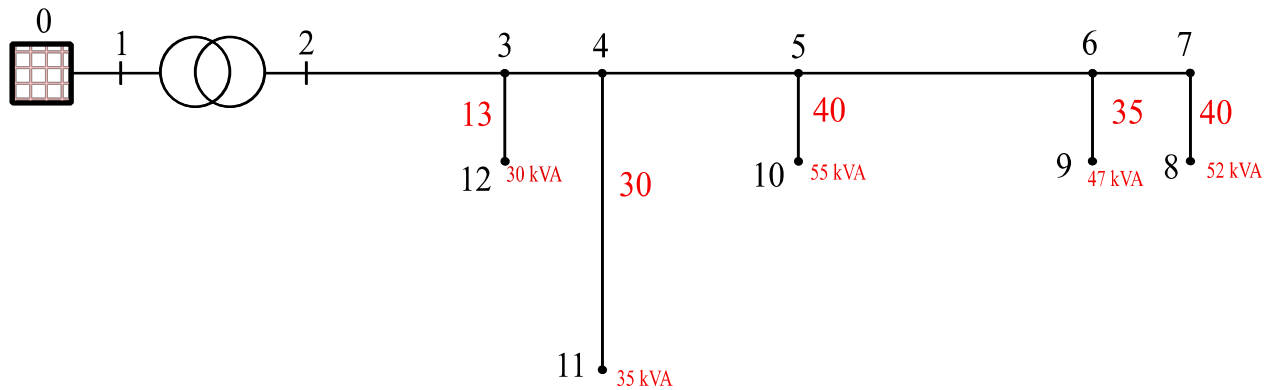


Figura 5-7. Representación gráfica redistribución de cargas

Los resultados de la redistribución anterior de cargas para cada nudo pueden encontrarse en el Anexo B.

5.3.2 Datos de entrada para la simulación de las redes

Antes de comenzar a explicar cómo se ha simulado esta red, conviene recordar que antes de todo ha sido necesario introducir todos los datos de la red que se han ido detallando en el Capítulo 4, es decir impedancias, longitudes, tipos de conductor, valor de las cargas, etc.

También ha sido necesario obtener los datos de consumo diario que han sido sacados del archivo *Graficas_consumo.xlsx*.

5.3.3 Simulación red exacta

En primer lugar, con todos los datos de la red introducidos vamos a proceder a realizar el barrido del árbol.

En primer lugar, aguas arriba, obteniendo las intensidades, del nudo 12 al 2:

```
% Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
for n=n_nodos:-1:2
    tension_abc_menos_neutro=nudo(n).tension(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension(4,t);
    nudo(n).Icarga(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
    li*nudo(n).Qcarga(:,t))./(tension_abc_menos_neutro'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga(1,t)=-sum(nudo(n).Icarga(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic
    %a la acumulada que ya hubiera le sumo esta nueva contribución
    nudo(n).Iacumulada(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t)+[nudo(n).Icarga(:,t);nudo(n).Ineutrocarga(1,t);
    %toda la Iacumulada que llevemos es la que va a pasar por la rama correspondiente
    rama(n).I(:,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t);
    %me voy al nudo padre de la rama y le sumo lo que he obtenido
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)+ rama(n).I(:,t);
    %segun esto, en cada nudo voy a tener sumadas todas las intensidades que llegan desde todos lados
end
```

A continuación, aguas abajo, obtendremos las tensiones del nudo 2 al 12:

```
% Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
tension=[nudo(1).tension(:,t)];
Vnudo_a(1,t)=[nudo(1).tension(1,t)];
Vnudo_b(1,t)=[nudo(1).tension(2,t)];
Vnudo_c(1,t)=[nudo(1).tension(3,t)];
Vnudo_n(1,t)=[nudo(1).tension(4,t)];
nudo(1).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0]; % la hacemos ya 0 para la proxima iteración
for n=2:n_nodos
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(n).tension(:,t)=nudo(nudo_padre).tension(:,t)-rama(n).impedancia*rama(n).I(:,t);
```



```
tension=[tension; nudo(n).tension(:,t)];
Vnudo_a(n,t)=nudo(n).tension(1,t);
Vnudo_b(n,t)=nudo(n).tension(2,t);
Vnudo_c(n,t)=nudo(n).tension(3,t);
Vnudo_n(n,t)=nudo(n).tension(4,t);
nudo(n).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0];
end
```

Es importante recordar en este punto que al tratarse del circuito exacto vamos a usar la $Z_{4 \times 4}$ completa en las líneas.

Todo este proceso, se va a repetir iterativamente hasta que la mayor diferencia de tensiones en un nudo entre una iteración y la anterior, sea menor que 0,00001 V:

```
while (residuo >=0.00001)
    num iter=num iter+1;

    % Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
    for n=n_nudos:-1:2
        tension abc menos neutro=nudo(n).tension(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension(4,t);
        nudo(n).Icarga(1:3,t)=le3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
        li*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension abc menos neutro)'.'); % I=(S/U)*
        nudo(n).Ineutrocarga(1,t)=-sum(nudo(n).Icarga(:,t)); % -In=Ia+Ib+Ic
        %a la acumulada que ya hubiera le sumo esta nueva contribución
        nudo(n).Iacumulada(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t)+[nudo(n).Icarga(:,t);nudo(n).Ineutrocarga(1,t)];
        %toda la Iacumulada que llevemos es la que va a pasar por la rama correspondiente
        rama(n).I(:,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t);
        %me voy al nudo padre de la rama y le sumo lo que he obtenido
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)+ rama(n).I(:,t);
        %segun esto, en cada nudo voy a tener sumadas todas las intensidades
        %que llegan desde todos lados
    end

    % Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
    tension=[nudo(1).tension(:,t)];
    Vnudo_a(1,t)=[nudo(1).tension(1,t)];
    Vnudo_b(1,t)=[nudo(1).tension(2,t)];
    Vnudo_c(1,t)=[nudo(1).tension(3,t)];
    Vnudo_n(1,t)=[nudo(1).tension(4,t)];
    nudo(1).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0]; % la hacemos ya 0 para la proxima iteración
    for n=2:n_nudos
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(n).tension(:,t)=nudo(nudo_padre).tension(:,t)-rama(n).impedancia*rama(n).I(:,t);
        tension=[tension; nudo(n).tension(:,t)];
        Vnudo_a(n,t)=nudo(n).tension(1,t);
        Vnudo_b(n,t)=nudo(n).tension(2,t);
        Vnudo_c(n,t)=nudo(n).tension(3,t);
        Vnudo_n(n,t)=nudo(n).tension(4,t);
        nudo(n).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0];
    end
    diferencia=abs(old_tension)-abs(tension);
    residuo=max(abs(diferencia));
    old_tension=tension;
end
```

Una vez esta condición se cumpla recalcularemos las intensidades en las ramas (que hemos borrado en el proceso iterativo) con las obtenidas a partir de las tensiones definitivas en los nudos.

El último paso es calcular las pérdidas del sistema. Para ello, hay que calcular la potencia total que cede el sistema, calculando la potencia compleja en el nudo de cabecera (el 1) y posteriormente restarlas con la potencia total de las cargas. En el código queda de la siguiente forma:

```
%POTENCIA cedida
Scede_slack(:,t)=(nudo(1).tension(:,t).'*rama(1).I(:,t)')/1000; %kVA ;S=(I*U)*
Pced(t)=real(sum(Scede_slack(:,t))); %kW
Qced(t)=imag(sum(Scede_slack(:,t))); %kVar
%fin POTENCIA cedida
```

```

%POTENCIA cargas
for n=1:n nudos
CargasP_a(n,t)=nudo(n).Pcarga(1,t);
CargasP_b(n,t)=nudo(n).Pcarga(2,t);
CargasP_c(n,t)=nudo(n).Pcarga(3,t);
CargasQ_a(n,t)=nudo(n).Qcarga(1,t);
CargasQ_b(n,t)=nudo(n).Qcarga(2,t);
CargasQ_c(n,t)=nudo(n).Qcarga(3,t);
end
Sumadecargas(1,t)=sum(CargasP_a(:,t))+sum(CargasQ_a(:,t))*1i;
Sumadecargas(2,t)= sum(CargasP_b(:,t))+sum(CargasQ_b(:,t))*1i;
Sumadecargas(3,t)= sum(CargasP_c(:,t))+sum(CargasQ_c(:,t))*1i;
P_total(t)=real(sum(Sumadecargas(:,t)));
Q_total(t)=imag(sum(Sumadecargas(:,t)));
%fin POTENCIA cargas
%PÉRDIDAS
Ploss total(t)=real(Scede slack(:,t)-sum(Sumadecargas(:,t))); %kW
Qloss total(t)=imag(Scede slack(:,t)-sum(Sumadecargas(:,t))); %kVar
%fin PÉRDIDAS

```

5.3.4 Simulación red con FIDI

Esa red es similar al anterior, únicamente modificaremos el valor de la Z, que en este caso será una matriz diagonal con las impedancias propias y las mutuas. Añadiendo esto, también debemos incluir las FIDI que simulan los acoplamientos. Se calculan de la siguiente forma:

```

%CÁLCULO de las FID
for n=1:n nudos
nudo(n).FIDacum(1:4,t)=0.0+0.0*1i;
end
for n=n nudos:-1:2
zeta=rama(n).impedancia;
for b=1:4
zeta(b,b)=rama(n).impmutua;
end
zeta=zeta/(rama(n).imppropia-rama(n).impmutua);
rama(n).FID(:,t)=zeta*rama(n).I(:,t);
%traslación de fuentes
no=rama(n).padre; %nudo origen de la rama
nf=n; %nudo final de la rama
%la FID de las fases a,b,c sale por el nudo final
nudo(nf).FIDacum(1:3,t)= nudo(nf).FIDacum(1:3,t)-rama(n).FID(1:3,t);
% y las 3 entran en el neutro+ todas sumadas en el neutro
nudo(nf).FIDacum(4,t)= nudo(nf).FIDacum(4,t)+sum(rama(n).FID(1:3,t))-sum(rama(n).FID(1:4,t));
%la FID de las fases a,b,c entra por el nudo origen
nudo(no).FIDacum(1:3,t)=nudo(no).FIDacum(1:3,t)+rama(n).FID(1:3,t);
% y las 3 salen del neutro
nudo(no).FIDacum(4,t)= nudo(no).FIDacum(4,t)-sum(rama(n).FID(1:3,t))+sum(rama(n).FID(1:4,t));
end
% fin CÁLCULO de las FID

```

Tras esto, el cálculo de las magnitudes de los nudos y ramas es prácticamente idéntico que el del proceso anterior. Realizamos el método del árbol sobre la red (esta vez teniendo en cuenta las FIDI) e iteramos hasta conseguir un error menor que 0,00001 V. Se muestra a continuación el código utilizado:

```

while (residuo_FID >=0.00001)
num iter FID=num iter FID+1;

% Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
for n=n nudos:-1:2
tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
nudo(n).Icarga_FID(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_FID)'.'); % I=(S/U)*

```

```

nudo(n).Ineutrocarga_FID(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_FID(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_FID(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)+[nudo(n).Icarga_FID(:,t);nudo(n).Ineutrocarga_FID(1,t)]-nudo(n).FIDacum(:,t);
rama(n).I_FID(:,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t);
nudo_padre=rama(n).padre;
nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)+ rama(n).I_FID(:,t);
end

% Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
tension_FID=nudo(1).tension_FID(:,t);
Vnudo_a_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(1,t)];
Vnudo_b_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(2,t)];
Vnudo_c_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(3,t)];
Vnudo_n_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(4,t)];
nudo(1).Iacumulada_FID(:,t)=[0;0;0;0]; %para la proxima iteración
for n=2:n_nudos
nudo_padre=rama(n).padre;
nudo(n).tension_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).tension_FID(:,t)-rama(n).Zdiag*rama(n).I_FID(:,t);
tension_FID=[tension_FID; nudo(n).tension_FID(:,t)];
Vnudo_a_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(1,t);
Vnudo_b_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(2,t);
Vnudo_c_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(3,t);
Vnudo_n_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(4,t);
nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)=[0;0;0;0];
end
diferencia_FID=abs(old_tension_FID)-abs(tension_FID);
residuo_FID=max(abs(diferencia_FID));
old_tension_FID=tension_FID;
end

```

Por último, solo nos queda evaluar las pérdidas. El cálculo de la mismas es similar al del proceso anterior. Vamos a calcular toda la potencia cedida por el sistema y restársela a la potencia total de las cargas. En este caso la potencia total cedida incluye 2 términos: Por un lado, la cedida por la red en el nudo 1 (como en el caso anterior) y por otro lado la cedida por las FIDI que hemos añadido. Sumando ambas potencias obtendríamos la total.

```

%POTENCIAS FID
for n=2:n_nudos
tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
CargasFID_a(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(1).'*nudo(n).FIDacum(1,t)')/1000;
CargasFID_b(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(2).'*nudo(n).FIDacum(2,t)')/1000;
CargasFID_c(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(3).'*nudo(n).FIDacum(3,t)')/1000;
% en este caso hay que añadir las cargas del neutro
nudo_padre=rama(n).padre;
CargasFID_n(n,t)=(nudo(nudo_padre).tension_FID(4,t)-
nudo(n).tension_FID(4,t)).'*(sum(rama(n).FID(1:4,t)))'/1000;
end
SumadeFID(1,t)=sum(CargasFID_a(:,t));
SumadeFID(2,t)=sum(CargasFID_b(:,t));
SumadeFID(3,t)=sum(CargasFID_c(:,t));
SumadeFID(4,t)=sum(CargasFID_n(:,t));
P_FID(t)=real(sum(SumadeFID(:,t)));
Q_FID(t)=imag(sum(SumadeFID(:,t)));
%fin POTENCIAS FID

```

Como puede observarse en esta parte del código, cabe señalar que la forma de calcular la potencia que ceden las FID es multiplicando el conjugado de su intensidad (propia de una fuente de intensidad como las de este tipo) y la tensión (es muy importante destacar que, al encontrarse entre una fase e el neutro, la tensión a la que se somete la FIDI es la tensión fase-neutro y no la fase-tierra que estamos hallando en el barrido del árbol).

5.3.5 Simulación red real del laboratorio

Se va a dar un paso más y en este caso la primera simplificación de esta red consiste en eliminar una serie de FIDI, la de los nudos origen de cada rama con carga (nudos 3-7):

```

for n=n nudos:-1:2
nudo(n).FIDacum fil(:,t)=nudo(n).FIDacum(:,t);
end
%anulo las FID de los nudos origen de las ramas de las cargas (por esta razon las tensiones van
a ser ligeramente distintas)
for n=3:7
nudo(n).FIDacum fil(:,t)=0.0;
end

```

Las siguientes simplificaciones son en cuanto a las limitaciones de intensidad explicadas en la Sección 5.2.3.2. En primer lugar, la intensidad mínima que puede aportar el inversor es 5 A. A priori en la introducción de los datos se impuso que todas las intensidades que fuesen menores que esta (en el caso equilibrado), iban a igualarse a 5 A o lo que es lo mismo:

$$S_{min} = 5 \cdot 400 \cdot \sqrt{3} = 3,464 \text{ kVA} \quad (5-5)$$

Siendo S_{min} la mínima potencia que va a tener una carga a lo largo del consumo de 24 h.

Por tener una segunda comprobación, en el código también añadiremos la restricción que para las intensidades menores que esta anulen directamente la carga del nudo en cuestión:

```

if enable_filtro_min==1
%elimino las cargas que proporcionen las intensidades menores
%que la X
for f=1:3
flag=0;
if abs(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))<X
nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).FIDacum_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).Icarga_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=0.0;
flag=1;
end
if flag==1
nudo(n).Iacumulada_fil(4,t)=-sum(nudo(n).Iacumulada_fil(1:3,t));
nudo(n).Ineutrocarga_fil(f,t)=-sum(nudo(n).Icarga_fil(1:3,t));
end
end
end

```

Otra simplificación que va a sufrir esta red es la de las intensidades máximas admisibles en cada rama. Es necesario tenerlas en cuenta y por ello se ha diseñado un filtro para estas intensidades. El filtro actúa de tal forma que cada vez que superemos una intensidad máxima de una rama durante el cálculo en el barrido del árbol, procederemos a disminuir un 1 % la carga de ese nudo. Posteriormente se volverán a recalcular las intensidades con este nuevo valor de carga y se volverá a comprobar si se supera la intensidad máxima. Este proceso es, como se puede deducir, iterativo, continuará disminuyendo la carga hasta conseguir que la intensidad máxima en esa rama no se supere. El código a continuación muestra como se ha implementado este proceso:

```

if enable_filtro_max==1
%compruebo que ninguna intensidad se pasa del máximo. En el
%caso de pasarse, voy a ir disminuyendo un 1 % la carga del
%nudo correspondiente
for f=1:3
i=1;
while(real(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))>Imax(n))
i=i-0.01;
nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=nudo(n).Pcarga_fil(f,t)*i;
nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=nudo(n).Qcarga_fil(f,t)*i;
%vuelvo a calcular las intensidades
for nn=n nudos:-1:2
nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)=0.0;
end
for nn=n nudos:-1:2

```

```

nudo(nn).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(nn).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(nn).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
nudo(nn).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(nn).Icarga_fil(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(nn).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(nn).Icarga_fil(:,t);nudo(nn).
Ineutrocarga_fil(1,t)]-nudo(nn).FIDacum_fil(:,t);
rama(nn).I_fil(:,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t);
nudo_padre=rama(nn).padre;

nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+ rama(nn).I_fil(:,t);
end
end
end
end

```

Por último, el proceso de cálculo de las pérdidas de esta red es análogo al de la red de la Sección 5.3.4.

No podemos dejar pasar por alto el hecho de que en esta última simulación hemos forzado a las cargas a ser modificadas en el caso de superar una intensidad máxima. Esto va a repercutir en la simulación global de las 3 redes y posterior comparación, ya que vamos a estar comparando redes con diferentes estados de carga. En este caso los resultados no serían válidos. Por este motivo es necesario realizar una “segunda vuelta” por todo el código volviendo a calcular de nuevo la red exacta para el nuevo estado de carga. Al ser modificada la red exacta, va a modificarse el valor de las FIDI, por lo que de nuevo habrá que calcular la red con las FIDI y la red real del laboratorio. Esta segunda vuelta será suficiente con realizarla una vez ya que nos hemos asegurado en la “primera vuelta” de que las cargas no superan los valores de las intensidades máximas. Los resultados de los perfiles de cargas una vez han sido modificados pueden encontrarse en el Anexo B.

5.4 Resultados

En este apartado nos encargaremos de analizar los resultados obtenidos en la simulación del código del Anexo A, que ha sido explicado en la sección anterior. La intención de esta sección no es otra que verificar los resultados de las simulaciones que se han comentado anteriormente, realizando las comparaciones oportunas de la red y obteniendo las conclusiones pertinentes. Para ello, esta verificación se va a hacer con la red equilibrada y para el perfil de 24 h mostrado en la Figura 3-6.

Compararemos los resultados de las magnitudes más importantes a tener en cuenta: las caídas de tensión y las pérdidas.

5.4.1 Resultados red exacta

En primer lugar, observemos las tensiones que tenemos en la red exacta. Las gráficas que se muestran a continuación muestran los valores de las tensiones en cada nudo para las 24 h. Se observa que cuando hay un mayor nivel de carga, las caídas de tensión son algo mayores.

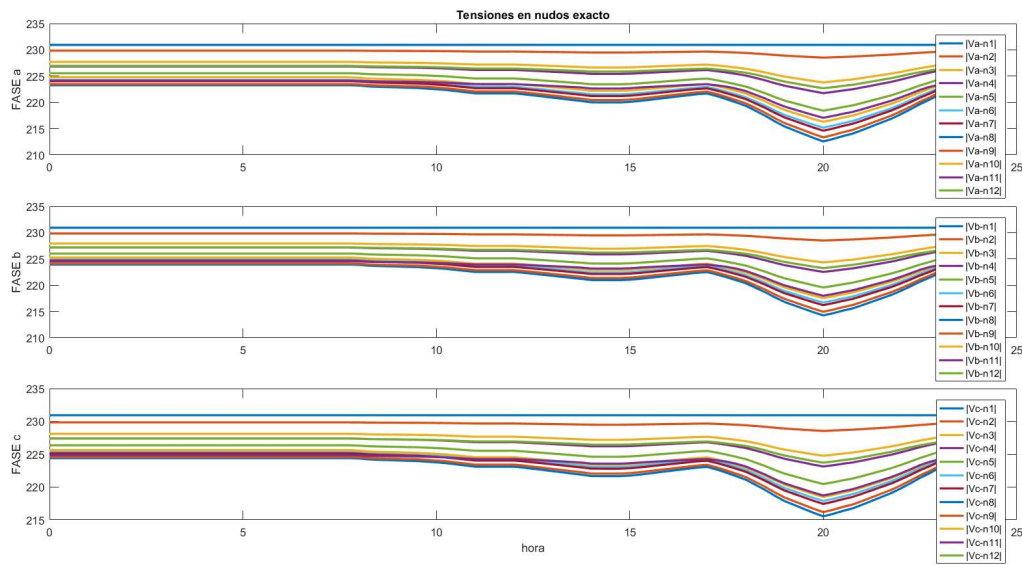


Figura 5-8. Tensiones abc circuito exacto

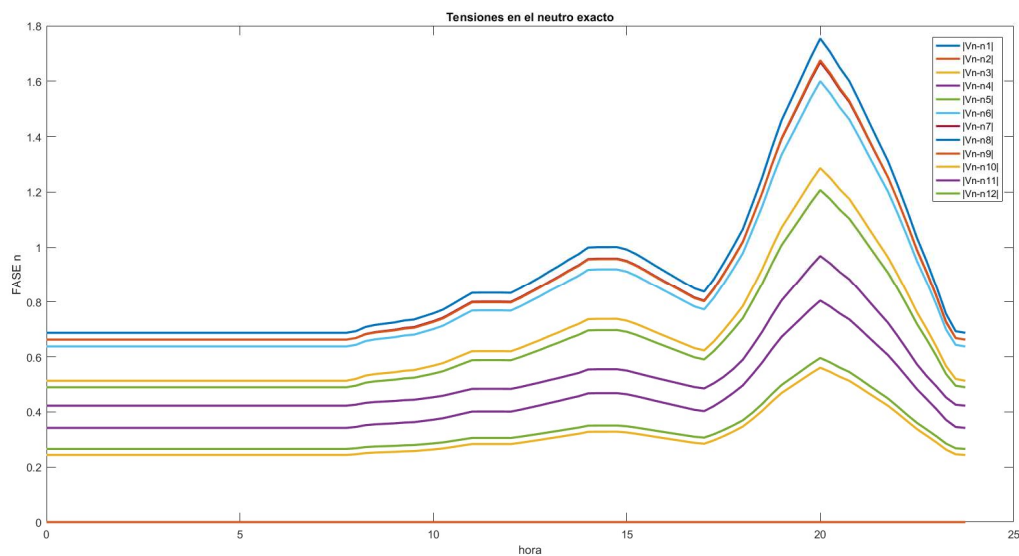


Figura 5-9. Tension neutro circuito exacto

A continuación, mostraremos los resultados de las potencias cedidas, absorbidas y las pérdidas del sistema. Como se observa en la Figura 5-10, el punto con la mayor carga total va a coincidir exactamente con aquel donde hay una mayor caída de tensión. También es necesario recalcar que las pérdidas no son muy grandes en relación con la potencia que se está absorbiendo, con lo que son perfectamente asumibles.

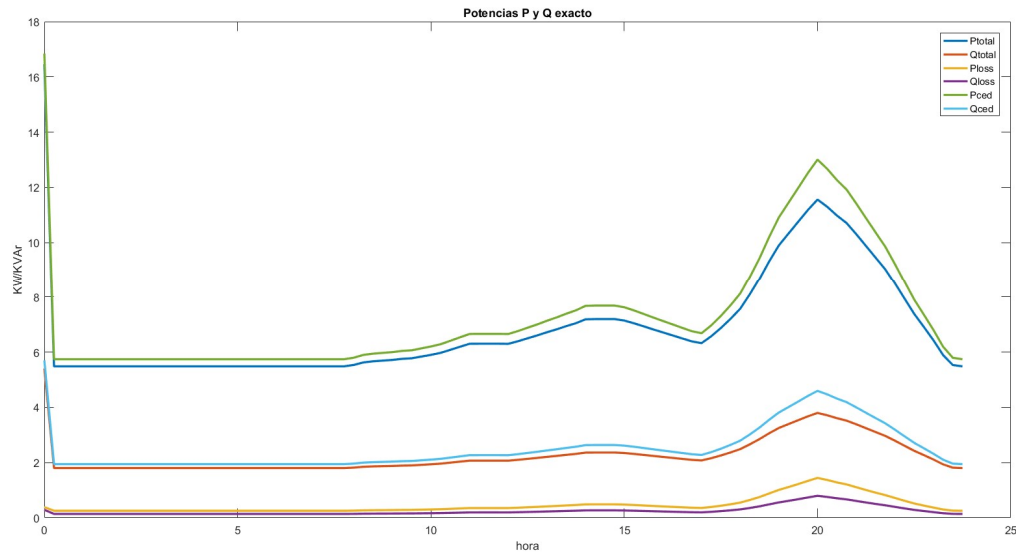


Figura 5-10. Potencias circuito exacto

5.4.2 Resultados red con FIDI

Al añadir las fuentes dependientes, vamos a conseguir emular los acoplamientos entre las líneas. A pesar de tener esta diferencia con la red anterior, esta red tendrá que tener un comportamiento idéntico a la exacta por lo que, además de mostrar los resultados de tensiones y potencias, también la compararemos con la exacta.

Mostramos en primer lugar las tensiones:

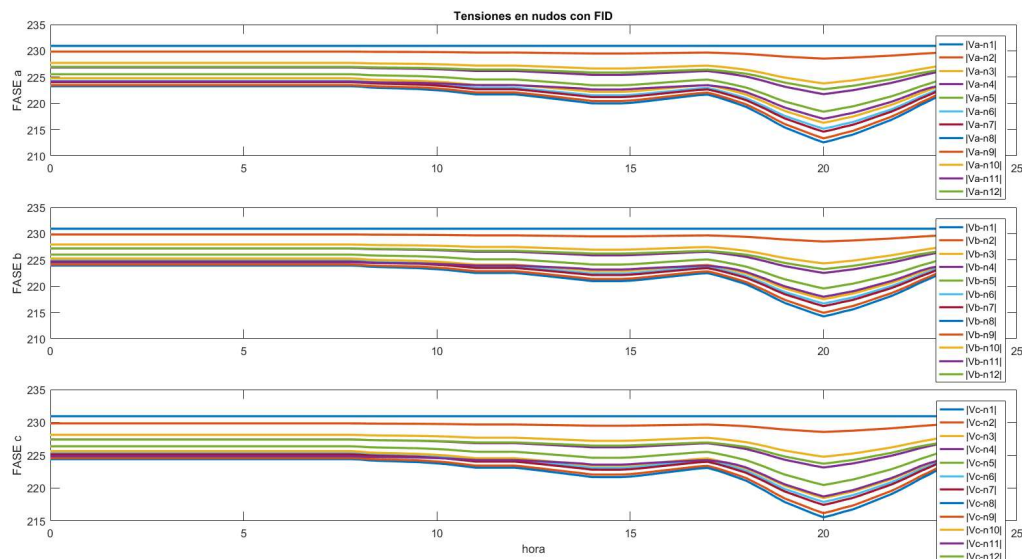


Figura 5-11. Tensiones abc circuito FIDI

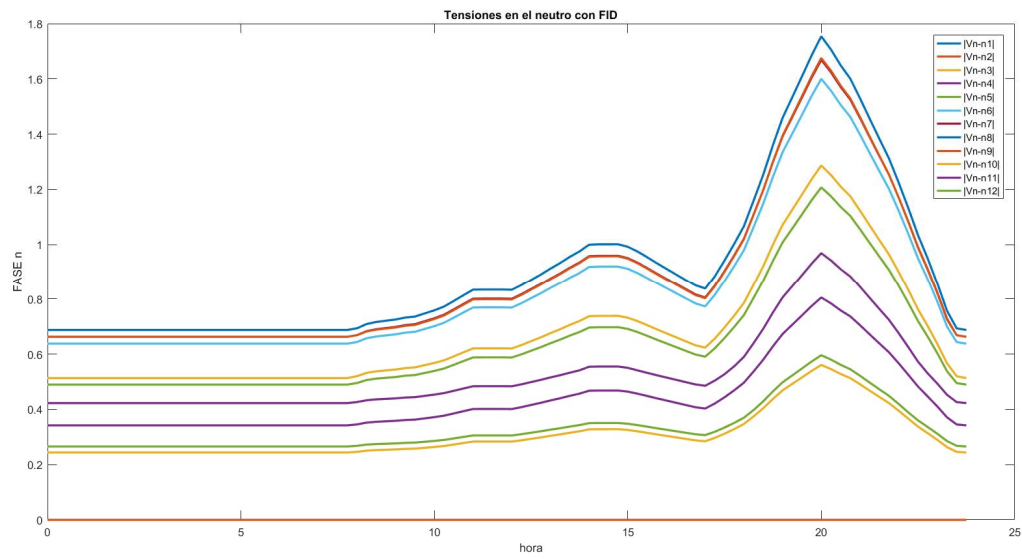


Figura 5-12. Tensiones neutro circuito FIDI

A simple vista parece que tienen una tendencia muy parecida a la de la red anterior. Para más seguridad vamos a evaluar la diferencia entre las tensiones de la red con las FIDI y la red exacta.

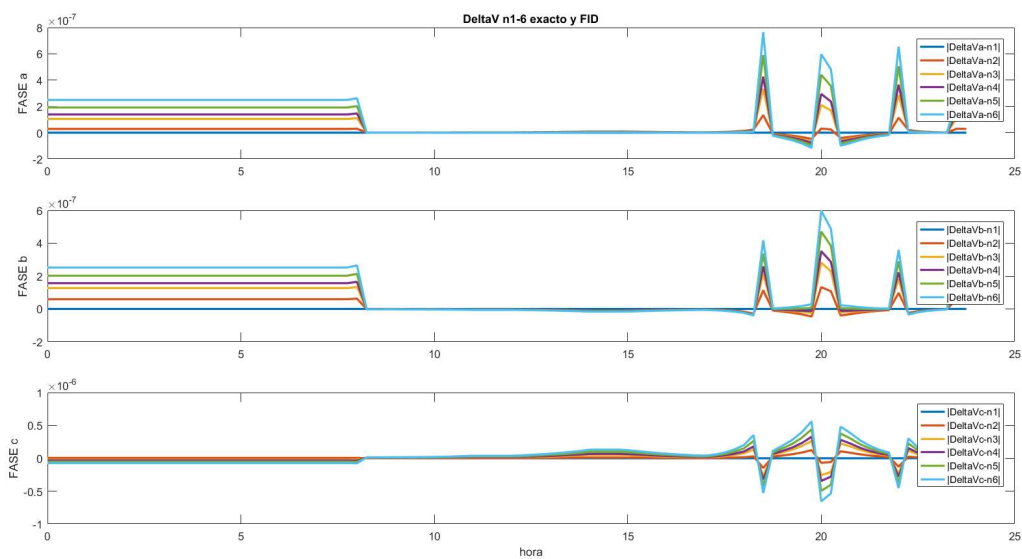


Figura 5-13. Comparación tensiones nudos 1-6 circuito FIDI

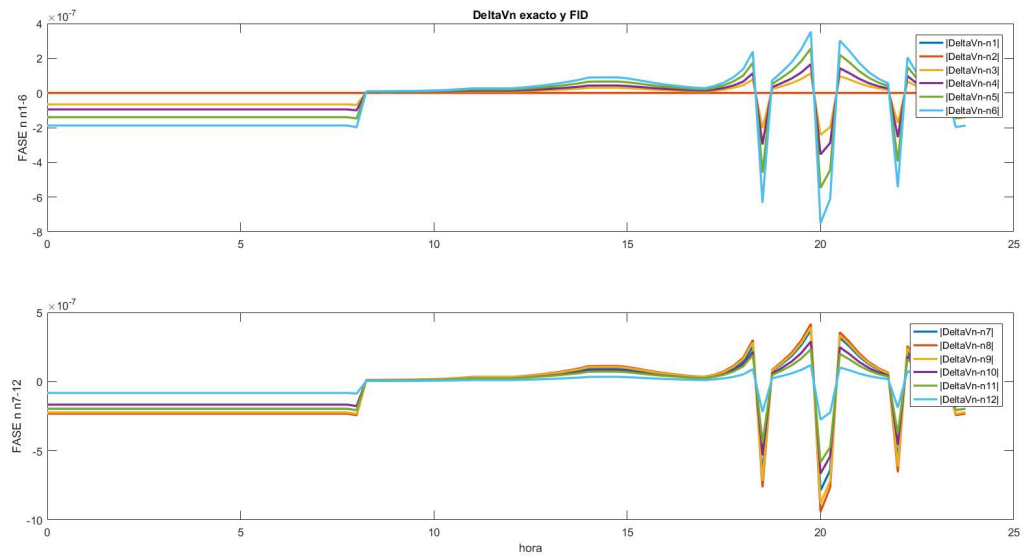


Figura 5-14. Comparación tensiones nudos 7-12 circuito FIDI

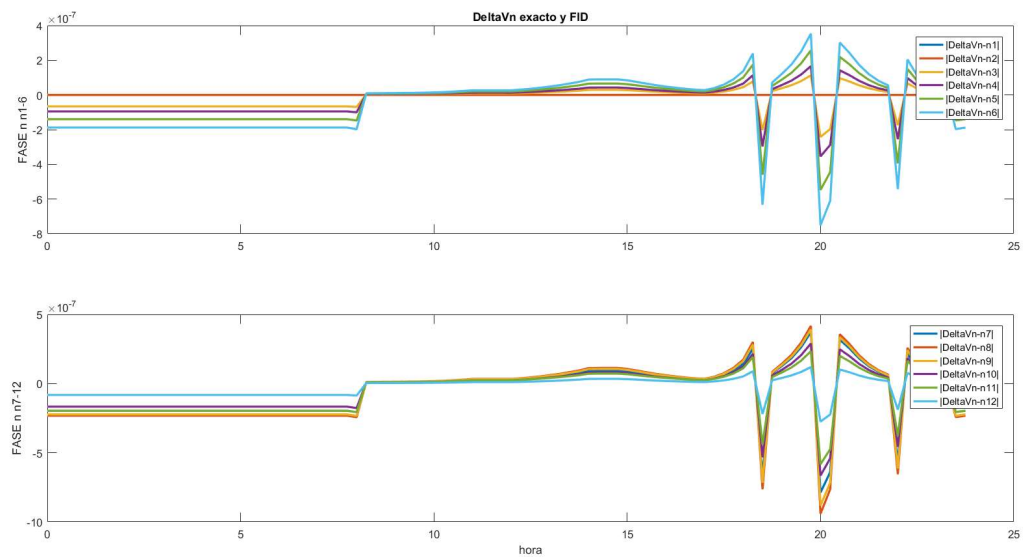


Figura 5-15. Comparación tensiones neutro circuito FIDI

Nos encontramos con errores del orden de 10^{-7} , por lo que puede verificarse que ambas redes tienen el mismo comportamiento en cuanto al nivel de tensiones.

Ahora procederemos a mostrar los valores de las potencias y su posterior comparación, como en el caso anterior.

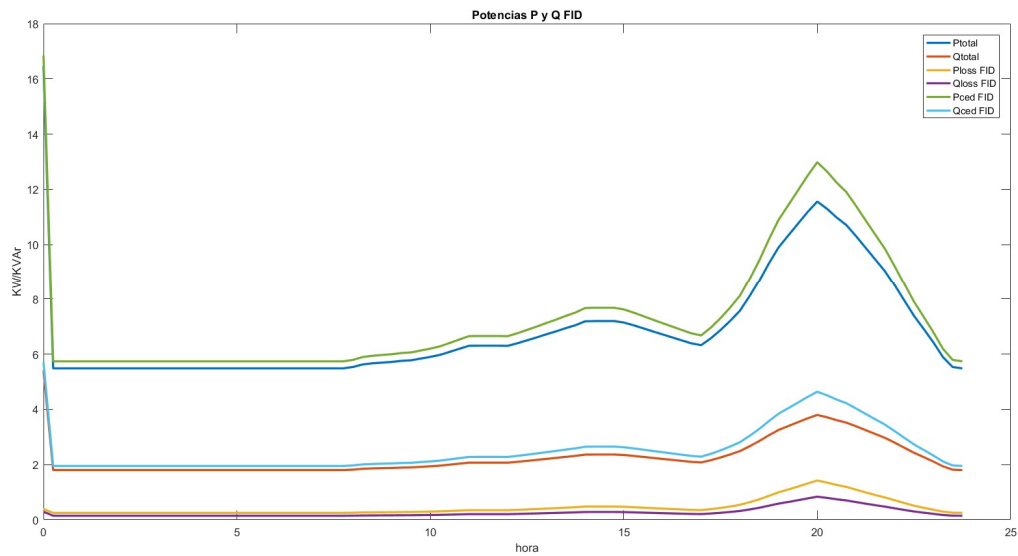


Figura 5-16. Potencias circuito FIDI

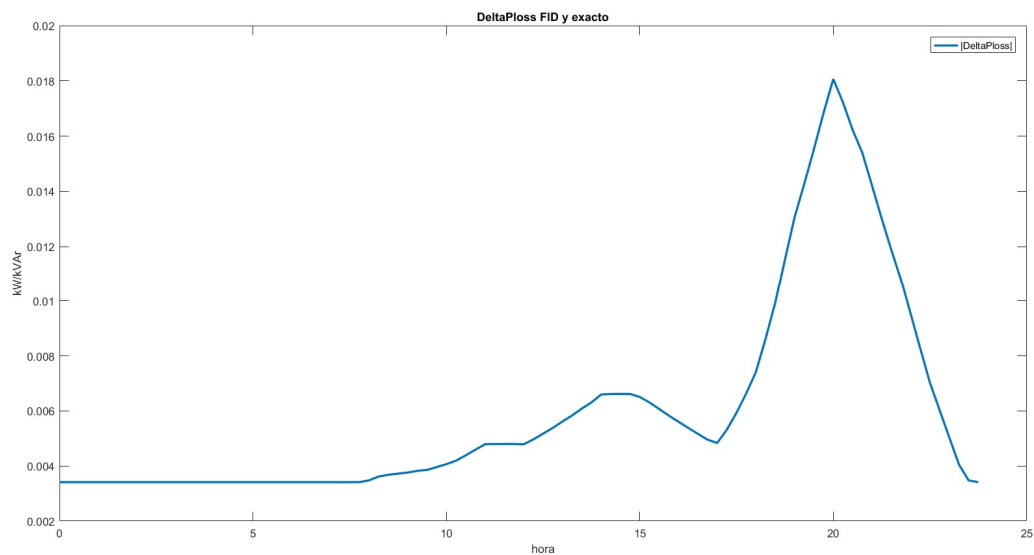


Figura 5-17. Comparación pérdidas circuito FIDI

Se observa que, si existe un pequeño error en la comparación de pérdidas del sistema, pero es completamente asumible al ser del orden de 0.015 kW en su punto máximo.

5.4.3 Resultados red real del laboratorio

En esta última red cabe recordar que se han eliminado las FIDI de los nudos 3 a 7. Justificaremos esta medida observando la figura a continuación:

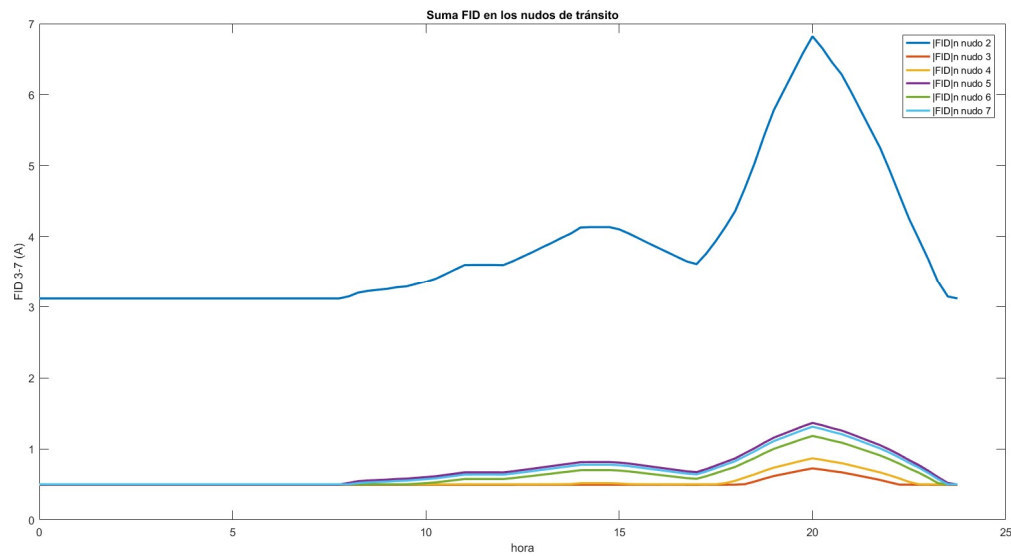


Figura 5-18. FIFI equivalente en los nudos de tránsito

Como se puede observar en la figura las FIDI equivalentes en los nudos 3,4,5,6,7 son muy pequeños comparados con la FIDI del nudo 2. Es por este motivo que está completamente justificado el hecho de eliminar estas FIDI, ya que el error es asumible.

Se procederá a continuación a mostrar los mismos resultados que en casos anteriores. En esta red, sí que esperamos encontrar diferencias algo notables. Mostraremos en primer lugar las tensiones:

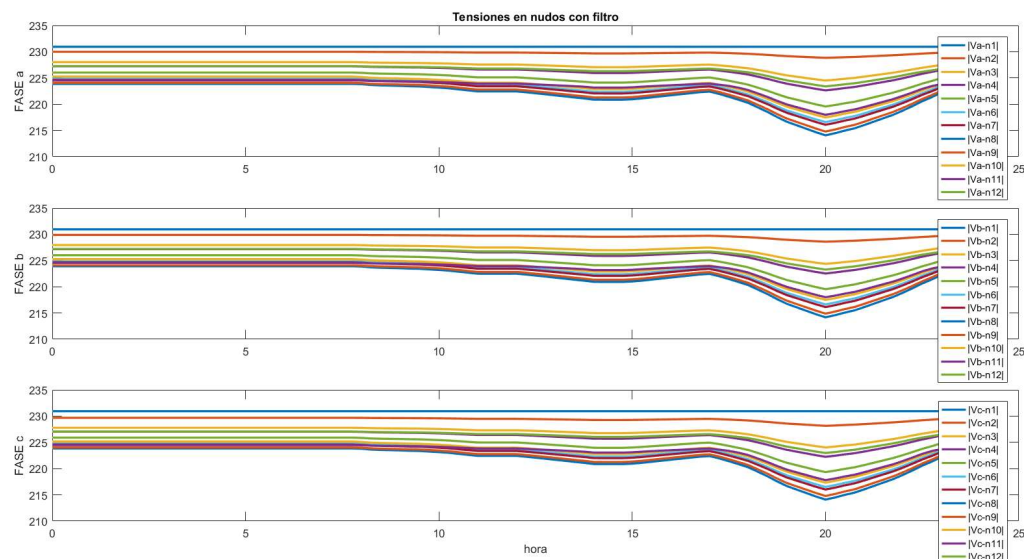


Figura 5-19. Tensiones abc circuito laboratorio

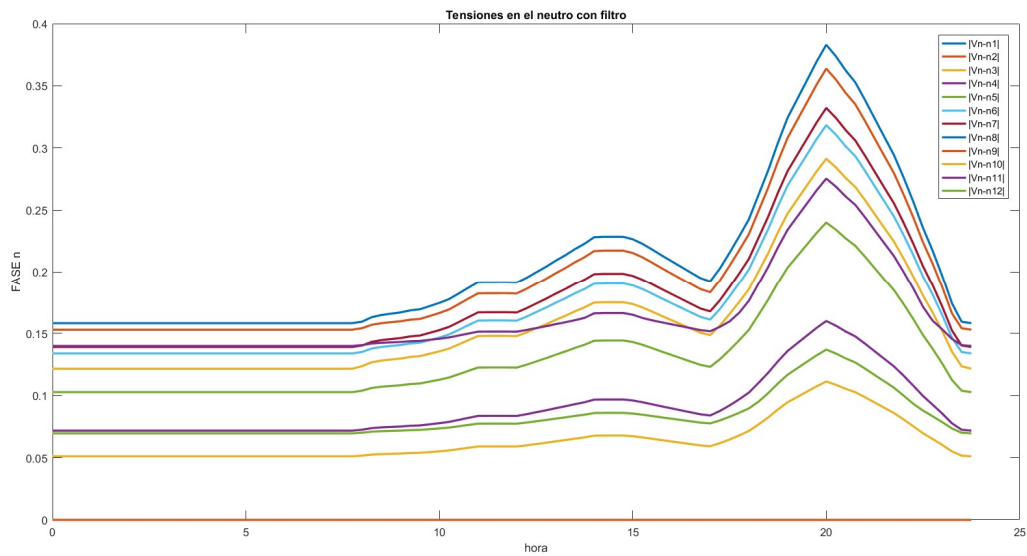


Figura 5-20. Tensiones neutro circuito laboratorio

Aparentemente siguen siendo parecidas, sin embargo en este caso sí que va a haber diferencias algo notables, como se puede observar en la Figura 5-21, aunque no van a superar los 1,5 V, por lo que este error es perfectamente asumible.

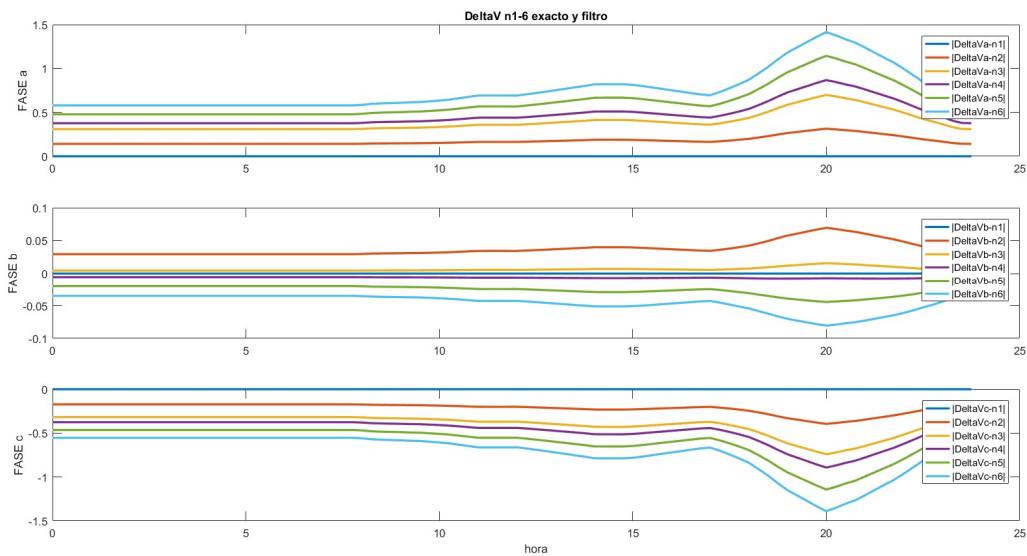


Figura 5-21. Comparación tensiones nudos 1-6 circuito laboratorio

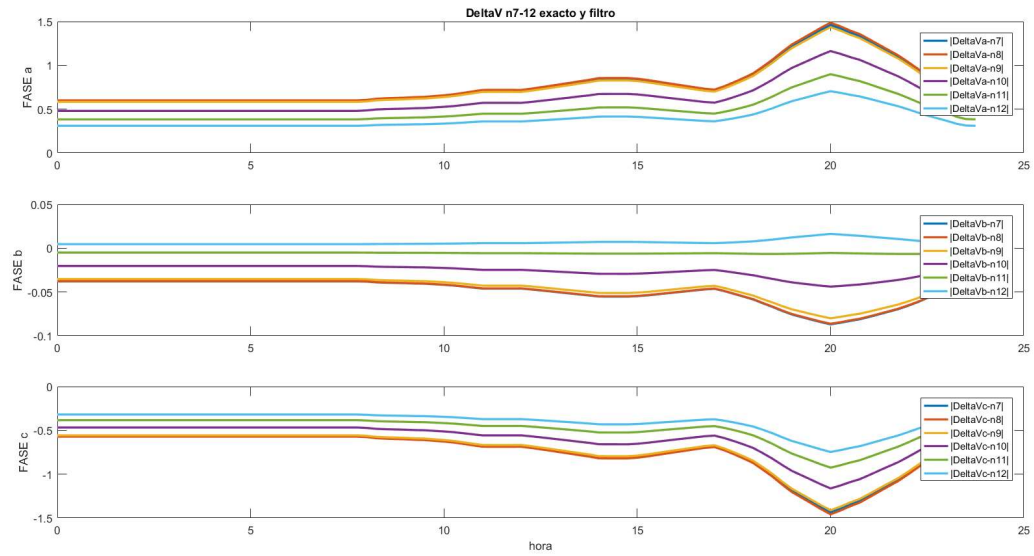


Figura 5-22. Comparación tensiones nudos 7-12 circuito laboratorio

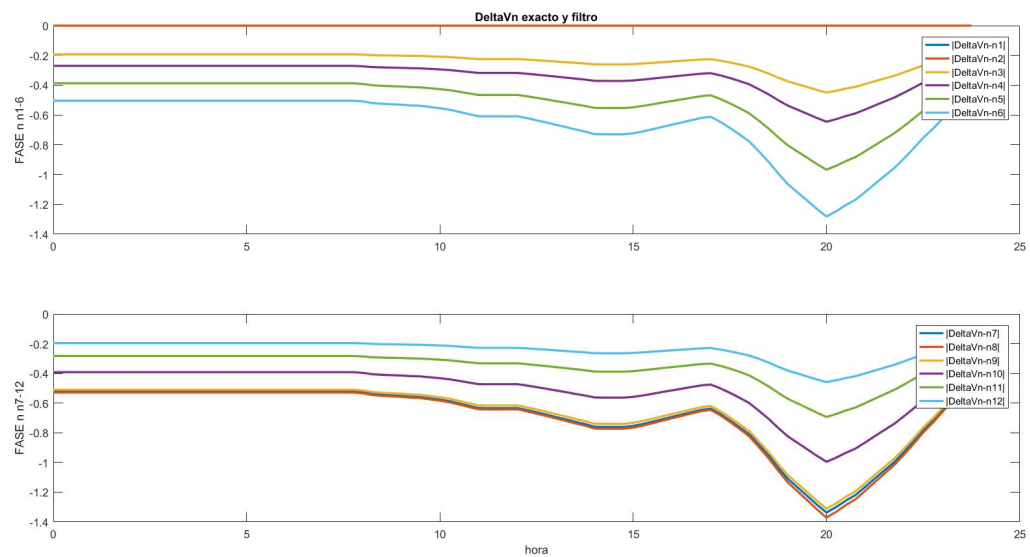


Figura 5-23. Comparación tensiones en el neutro circuito laboratorio

Por último, vamos a proceder a mostrar las potencias de esta red del laboratorio, que también siguen siendo similares a las de los dos casos anteriores.

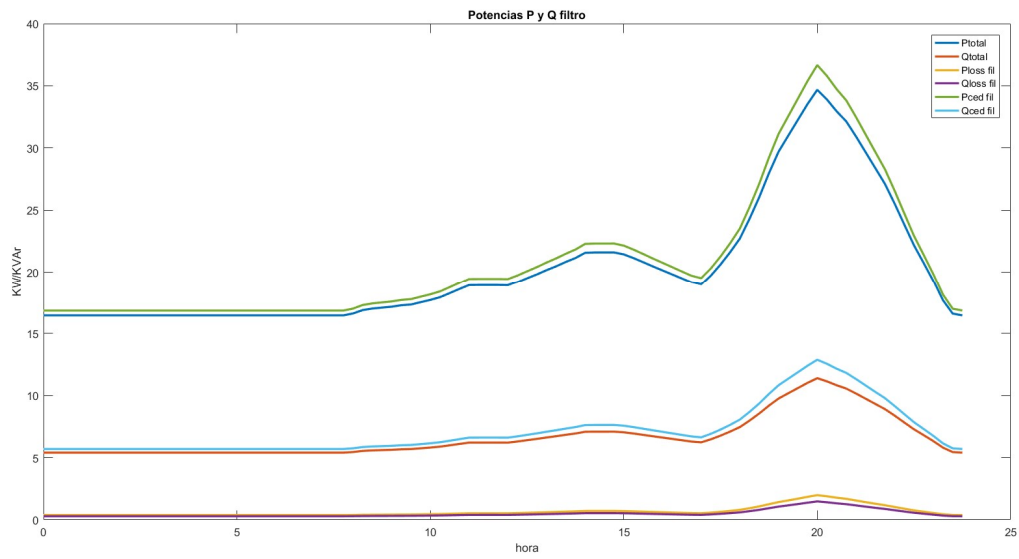


Figura 5-24. Potencias circuito laboratorio

Observando la diferencia de potencias vamos a ver más clara la diferencia entre las gráficas.

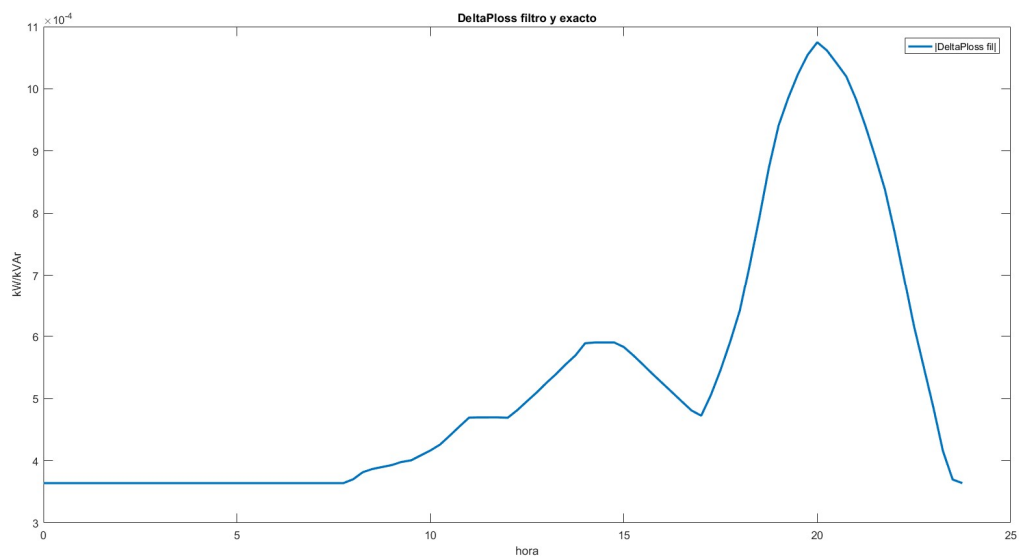


Figura 5-25. Comparación pérdidas circuito laboratorio

En este caso la diferencia de pérdidas es del orden de 10^{-4} , por lo que podemos concluir que son completamente asumibles.

5.5 Conclusiones de los resultados

Ante los resultados de la simulación expuestos en el apartado anterior, podemos concluir:

- La red exacta y la red con las FIDI pueden considerarse completamente equivalentes. En vista de los resultados, podemos afirmar esto ya que la diferencia en tensiones es prácticamente nula y la de potencias (aunque más significativa), perfectamente asumible.
- La red del laboratorio es una buena aproximación a la red exacta y sus limitaciones no impiden que los resultados sean prácticamente idénticos, con errores pequeños y en los momentos de cargas más altas. Estos errores son asumibles y están justificados en los estudios que se van a realizar en esta red.

6 ENSAYOS DE LA RED A ESCALA PARA CONSUMOS DESEQUILIBRADOS

En este capítulo se van a proponer una serie de ensayos para realizar en la red de laboratorio. La principal característica de estos, es la existencia de desequilibrios entre las fases, que harán que la red se comporte de manera diferente con respecto al caso equilibrado.

6.1 Desequilibrios

Al estar tratando con una red de Baja Tensión europea no podemos obviar el comportamiento de la misma en un sistema real. Este comportamiento pasa por la existencia de cargas monofásicas que van a hacer que algunas fases lleven más intensidad que otras produciendo desequilibrios y haciendo que circule una intensidad por el neutro distinta de 0.

Por este motivo, en las simulaciones a realizar se realizarán ensayos con distintos niveles de desequilibrios para observar también el comportamiento de la red ante este fenómeno. Los desequilibrios que va a ser posible ensayar en esta simulación, están expuestos en la siguiente tabla.

Tabla 6-1. Desequilibrios propuestos

Desequilibrio	Fase a (%)	Fase b (%)	Fase c (%)
Extremo	70	30	0
Grave	60	30	10
Medio	50	30	20
Leve	40	30	30
Equilibrio	33,33	33,33	33,33

Cada celda representa el porcentaje del nivel de carga que va a transportar la fase en cada instante.

6.1.1 Descripción de los desequilibrios a ensayar

En este capítulo se van a describir un total de 4 ensayos de los cuales se mostrarán los resultados de tensiones.

Como hemos comentado anteriormente, la red va a estar desequilibrada. Estos desequilibrios van a tener el mismo valor en todas las cargas de la red. Sin embargo, se van a presentar dos casos diferentes dentro de esta situación:

- Desequilibrio total: Todas las cargas van a tener el mismo nivel de desequilibrio en cada una de sus fases.
- Desequilibrio alternado: Los niveles de desequilibrio se irán alternando entre fases de tal forma que en cada una de las cargas tendremos un porcentaje desequilibrado en una fase distinta. El motivo de este modo de proceder es intentar compensar el desequilibrio en el nudo de cabecera. Al ir alternando las

fases que van a llevar los distintos porcentajes de carga, conseguimos un resultado global algo más equilibrado, aunque no será igual que el caso en el que la carga se distribuye equilibradamente por las 3 fases.

Una vez presentados los tipos de casos a estudiar, se van a exponer los datos de entrada y posteriores resultados del caso simulado.

6.2 Ensayo 1: desequilibrio 40/30/30 alternado

En este primer ensayo, se va a simular un desequilibrio leve, en el que una de las fases tiene un porcentaje algo mayor de carga, pero no es un valor muy significativo. Asimismo, los porcentajes de carga se van a distribuir entre las 3 fases en cada una de las cargas. A continuación, se muestran los datos de entrada en este caso:

Tabla 6-2. Datos ensayo 1

Rama	S (kVA)	Fase a (%)	Fase b (%)	Fase c (%)
8	52	40	30	30
1	47	30	40	30
10	55	30	30	40
11	35	33,33	33,33	33,33
12	30	33,33	33,33	33,33

Se ha simulado este desequilibrio en el código obteniendo los siguientes resultados de tensiones:

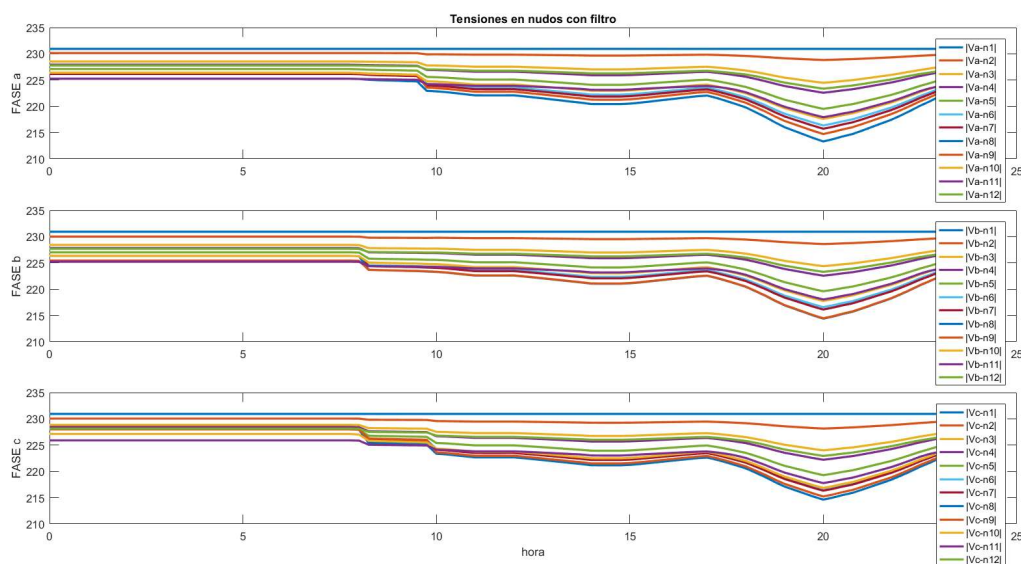


Figura 6-1. Tensiones abc desequilibrio 40/30/30 alternado

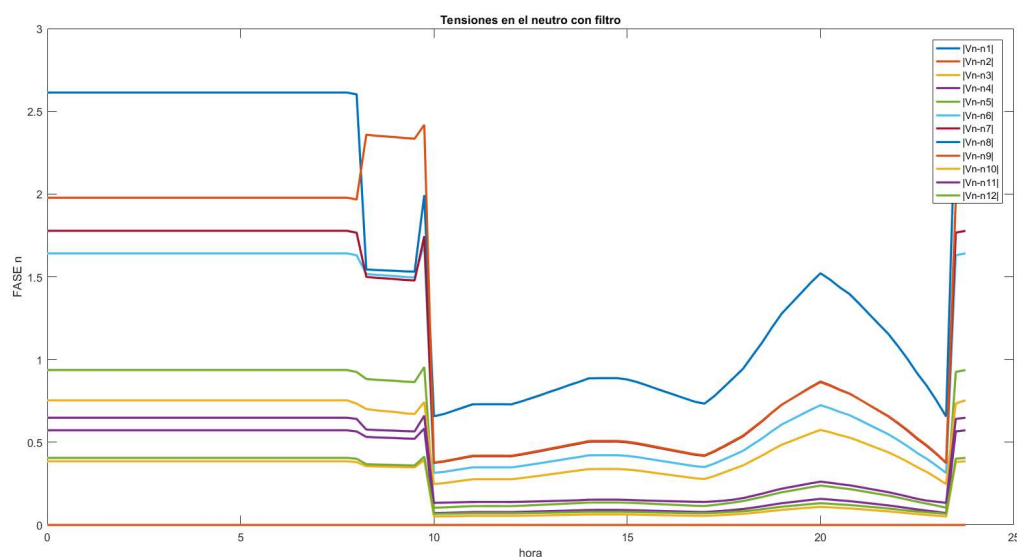


Figura 6-2. Tensiones neutro desequilibrio 40/30/30 alternado

Resulta interesante comparar este caso con el caso equilibrado mostrado en el Capítulo 5. En la tabla a continuación mostraremos los datos más relevantes a señalar. Los datos están obtenidos de la Tabla 6-2, de la Figura 5-19 y de la Figura 6-1:

Tabla 6-3. Análisis tensiones fase a desequilibrio 40/30/30 alternado

Rama	S (kVA)	Equilibrado		Desequilibrado	
		Carga (%)	Tensión (V)	Carga (%)	Tensión (V)
8	52	33,33	212,9	40	212,0
9	47	33,33	213,7	30	213,5
10	55	33,33	217,1	30	217

Como se puede observar a medida que se aumenta la carga de una fase, la tensión cae más. En este caso la diferencia más significativa es de 0,9 V en la fase a del nudo 8. Para el resto de nudos con carga, en la fase a se ha disminuido algo la carga: se ha pasado de 33,33 a 30 %. Esta disminución apenas se hace significativa en los resultados obtenidos, donde se observan diferencias de 0,1 y 0,2 V respectivamente.

La conclusión general es que este desequilibrio no afecta demasiado a las caídas de tensión que parecen verse compensadas por el hecho de estar alternando los desequilibrios entre las distintas fases de las cargas. La diferencia más notable se da en el nudo más alejado del nudo de cabecera y dónde se ha aumentado la carga un 10 % con respecto al caso desequilibrado por lo que el resultado es esperado.

6.3 Ensayo 2: desequilibrio 50/30/20 alternado

En el segundo ensayo, se va a simular un desequilibrio medio, en el que una de las fases tiene la mitad de la carga total. Al igual que anteriormente, este desequilibrio se va a ir alternando entre las fases de las diferentes cargas. A continuación, se muestran los datos de entrada en este caso:

Tabla 6-4. Datos ensayo 2

Rama	S (kVA)	Fase a (%)	Fase b (%)	Fase c (%)
8	52	50	30	20
1	47	20	50	30
10	55	30	20	50
11	35	33,33	33,33	33,33
12	30	33,33	33,33	33,33

Se ha simulado este desequilibrio en nuestro código obteniendo los siguientes resultados de tensiones:

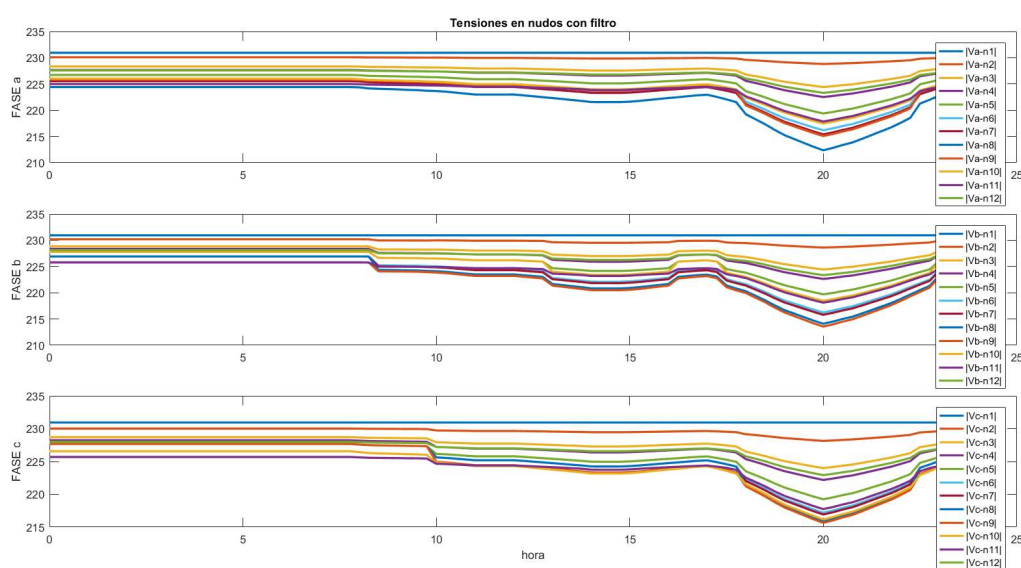


Figura 6-3. Tensiones abc desequilibrio 50/30/20 alternado

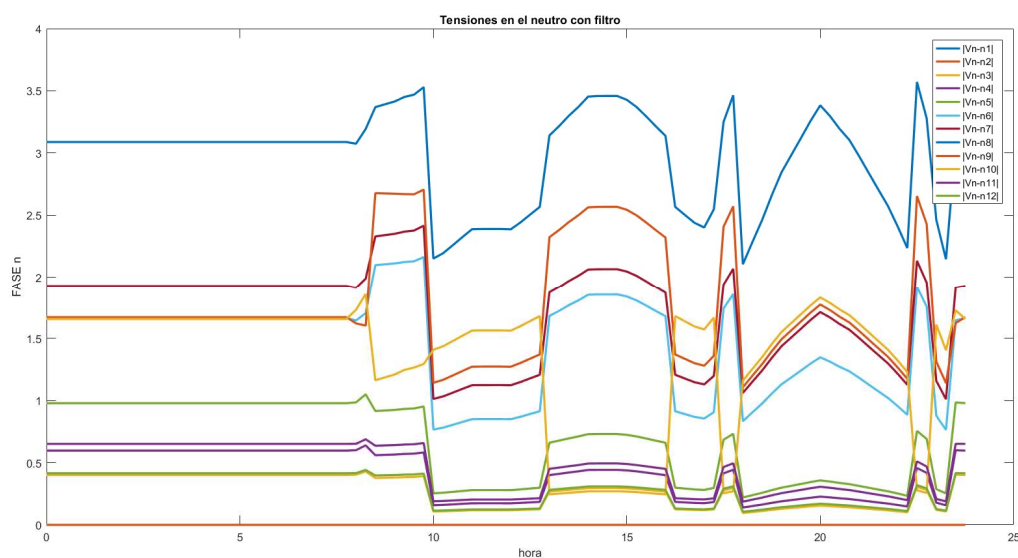


Figura 6-4. Tensiones neutro desequilibrio 50/30/20 alternado

Al igual que anteriormente, compararemos este desequilibrio con el caso equilibrado. Los datos de la tabla mostrada a continuación se han obtenido de la Tabla 6-4, la Figura 5-19 y la Figura 6-3:

Tabla 6-5. Análisis tensiones fase a desequilibrio 50/30/20 alternado

Rama	S (kVA)	Equilibrado		Desequilibrado	
		Carga (%)	Tensión (V)	Carga (%)	Tensión (V)
8	52	33,33	212,9	50	210,8
9	47	33,33	213,7	20	213,5
10	55	33,33	217,1	30	216,4

En este caso en el que la fase a lleva la mitad de la carga del nudo 8, la tensión cae 2,1 V con respecto al caso equilibrado. Resulta interesante observar el caso del nudo 9, donde la tensión cae 0,2 V con respecto al caso desequilibrado. Es de esperar que esta tensión suba al estar transportando esta fase mucha menos carga para ese nudo, sin embargo, al estar también transportándose la carga del nudo 8, que está más alejado, por el feeder principal, la tensión va a ser algo más baja que en el caso equilibrado. Esto explica también la caída de 0,7 V de la carga del nudo 10, que es la carga de mayor valor.

La conclusión del comportamiento de la red ante este desequilibrio, es que en este ensayo sí que se observa más caída de tensión en la red en general, a pesar de estar alternando los desequilibrios entre las fases, que hace que difiera algo más del caso equilibrado. El resultado es esperado, considerando el valor de las distintas cargas.

6.4 Ensayo 3: desequilibrio 40/30/30 total

En el tercer ensayo, se va a simular un desequilibrio leve de nuevo. Sin embargo, esta vez no vamos a alternar los porcentajes de carga entre las fases de las distintas cargas, en esta ocasión todas las cargas estarán sometidas al mismo desequilibrio en la misma fase. Es de esperar entonces, que en los resultados del nudo de cabecera este presente este desequilibrio de una forma más notable que en los casos anteriores. A continuación, se muestran los datos de entrada en este caso:

Tabla 6-6. Datos ensayo 3

Rama	S (kVA)	Fase a (%)	Fase b (%)	Fase c (%)
8	52	40	30	30
1	47	40	30	30
10	55	40	30	30
11	35	40	30	30
12	30	40	30	30

Se ha simulado este desequilibrio en nuestro código obteniendo los siguientes resultados de tensiones:

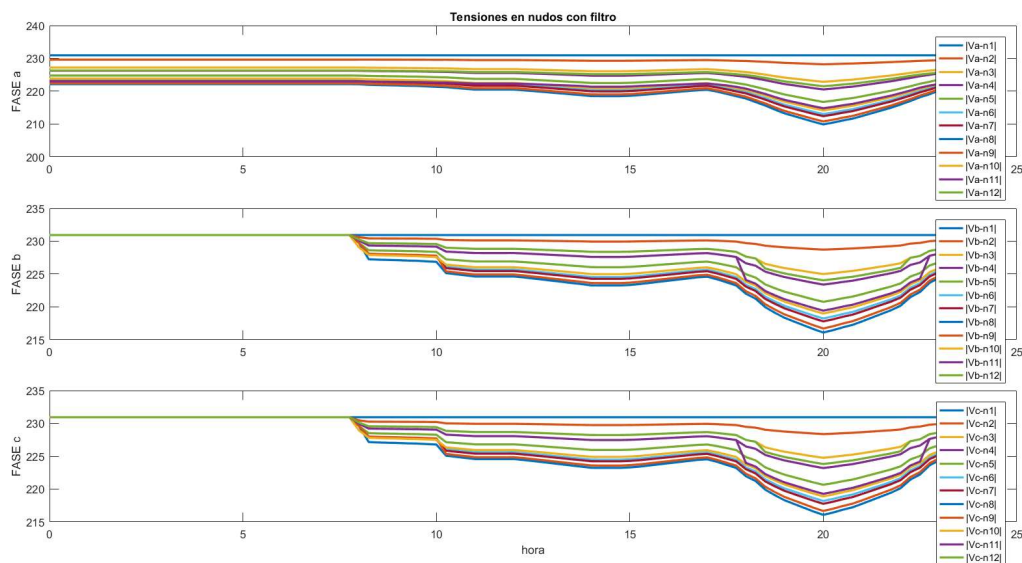


Figura 6-5. Tensiones abc desequilibrio 40/30/30 total

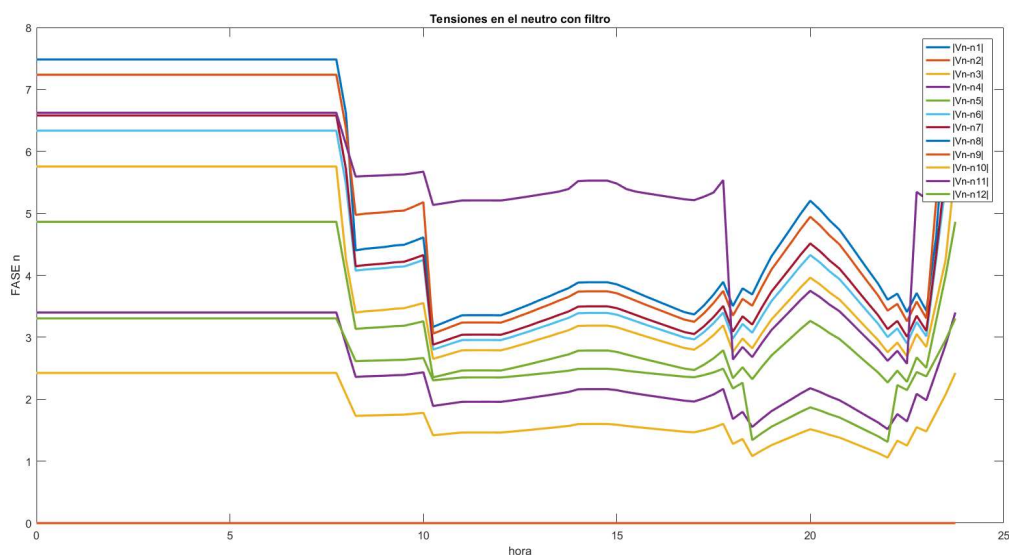


Figura 6-6. Tensiones neutro desequilibrio 40/30/30 total

Comparando con el caso del capítulo anterior, vamos a notar diferencias más significativas, aunque leves. Los datos de la tabla mostrada a continuación se han obtenido de la Tabla 6-6, la Figura 5-19 y la Figura 6-5:

Tabla 6-7. Análisis tensiones fase a desequilibrio 40/30/30 total

Rama	S (kVA)	Equilibrado		Desequilibrado	
		Carga (%)	Tensión (V)	Carga (%)	Tensión (V)
8	52	33,33	212,9	40	208,5
9	47	33,33	213,7	40	209,4
10	55	33,33	217,1	40	213,8

En este caso es posible concluir que los resultados generales difieren aún más del comportamiento en el caso

equilibrado. Es de esperar este resultado, ya que ahora sí que se tiene un desequilibrio leve en toda la red por igual, al estar demandando todas las cargas un 40 % de la potencia en la fase a. La mayor diferencia se produce en el nudo 8, con una tensión de 4,4 V de diferencia, debida al desequilibrio y al estar presente en este nudo una carga de valor alto.

6.5 Ensayo 4: desequilibrio 50/30/20 total

En el cuarto y último ensayo, se va a simular un desequilibrio medio en las mismas condiciones que el caso anterior, es decir, todas las cargas tendrán el mismo desequilibrio en cada una de sus fases. A continuación, se muestran los datos de entrada en este caso:

Tabla 6-8. Datos ensayo 4

Rama	S (kVA)	Fase a (%)	Fase b (%)	Fase c (%)
8	52	50	30	20
9	47	50	30	20
10	55	50	30	20
11	35	50	30	20
12	30	50	30	20

Se ha simulado este desequilibrio en nuestro código obteniendo los siguientes resultados:

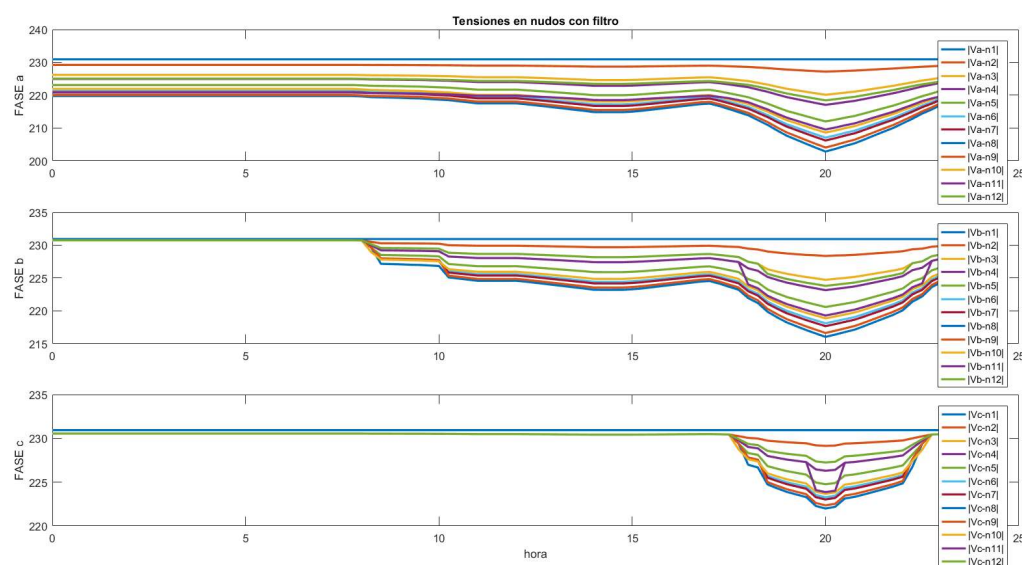


Figura 6-7. Tensiones abc desequilibrio 50/30/20 total

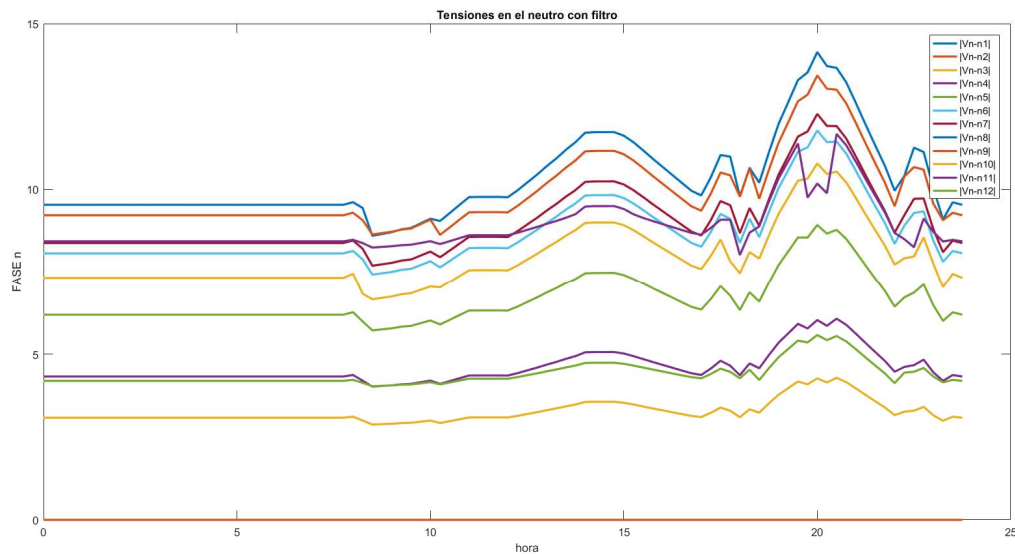


Figura 6-8. Tensiones neutro desequilibrio 50/30/20 total

Comparando con el caso anterior se van a notar diferencias más significativas al estar transportando una fase la mitad de la carga de todos los nudos. Los datos de la tabla mostrada a continuación, se han obtenido de la Tabla 6-8, la Figura 5-19 y la Figura 6-7:

Tabla 6-9. Análisis tensiones fase a desequilibrio 50/30/20 total

Rama	S (kVA)	Equilibrado		Desequilibrado	
		Carga (%)	Tensión (V)	Carga (%)	Tensión (V)
8	52	33,33	212,9	50	200,8
9	47	33,33	213,7	50	202,1
10	55	33,33	217,1	50	207,1

En este último caso los resultados difieren bastante con respecto al caso equilibrado, como era de esperar ante un equilibrio medio. La mayor diferencia de tensiones se da en el nudo 8, con un total de 12,1 V de diferencia. No obstante, las diferencias de los otros nudos también son reseñables con valores de 11,6 V y 10 V en los nudos 9 y 10 respectivamente.

7 DATOS DE ENTRADA DE PARA LA RED DEL LABORATORIO

Tanto en el Capítulo 5 como en el 6 se han mostrado una serie de resultados obtenidos de la simulación del código que se muestra en el Anexo A. El objetivo de capítulos anteriores ha sido analizar estos resultados en base a comparaciones y justificarlos convenientemente. Una vez validado el funcionamiento del código y asumiendo los errores que podemos encontrar, se va a proceder a utilizar estos datos como entrada para el ensayo real de la red en el laboratorio.

Los datos que necesitamos de entrada para simular un perfil de cargas cualquiera en la red del laboratorio son por un lado las potencias activas y reactivas consumidas/generadas por las cargas y por otro lado los valores de las intensidades que circulan por las fuentes dependientes que modelan los acoplamientos.

Estos datos pueden ser obtenidos muy fácilmente del código del Anexo A. Para poder introducir los datos en la red vamos a necesitar en primer lugar que las intensidades comentadas anteriormente tengan como origen de fase el nudo sobre el que van a ser vertidas. Para ello va a ser necesario realizar una transformación muy simple de los resultados que se traducirá en que la nueva fase va a ser la diferencia entre la fase de la tensión y la de la intensidad actual.

Otra transformación a tener en cuenta va a ser la de las potencias. Estas pueden ser introducidas en la red siendo tanto positivas como negativas. El criterio a seguir es el siguiente:

- Potencias P y Q negativas: consumos (como los que se tratan en todo este proyecto)
- Potencias P y Q positivas: generaciones (para ensayar escenarios de generación distribuida).

Todos estos datos van a ser introducidos en una hoja de cálculo Excel: *DATOS_REDBT_24h.xlsx*, que contiene la información individual de los datos de entrada de cada convertidor. Esta hoja de cálculo esta a su vez subdividida en 6 hojas (una para cada convertidor) que están organizadas por columnas. Entre cada columna de datos de P, Q o I es necesario que haya una columna de tiempo (t). Para tener una idea más visual se mostrará a continuación una fotografía de la misma.

En el caso representado en la Figura 7-1 se ha simulado el caso equilibrado.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1 t (s)	P _a (W)	Q _a (Var)	t (s)	P _b (W)	Q _b (Var)	t (s)	Q _c (Var)	P _c (W)	t (s)	Re _a (A) t (s)	Im _a (A _{react}) (s)	Re _b (A) t (s)	Im _b (A _{react}) (s)	Re _c (A) t (s)	Im _c (A _{react}) (s)	t (s)	Re _a (A) t (s)	Im _a (A _{react}) (s)	t (s)	Re _b (A) t (s)	Im _b (A _{react}) (s)	t (s)	Re _c (A) t (s)	Im _c (A _{react}) (s)
2	1	-1.096.9655	1	-1.096.9655	1	-360.5551	1	-1.096.9655	1	-1.096.9655	1	0.0281	1	0.0281	1	0.0416	1	0.0196	1	0.0416	1	0.0997	1	-0.0699
3	2	-1.096.9655	2	-1.096.9655	2	-360.5551	2	-1.096.9655	2	-1.096.9655	2	0.0281	2	0.0281	2	0.0416	2	0.0196	2	0.0416	2	0.0997	2	-0.0699
4	3	-1.096.9655	3	-1.096.9655	3	-360.5551	3	-1.096.9655	3	-1.096.9655	3	0.0281	3	0.0281	3	0.0416	3	0.0196	3	0.0416	3	0.0997	3	-0.0699
5	4	-1.096.9655	4	-1.096.9655	4	-360.5551	4	-1.096.9655	4	-1.096.9655	4	0.0281	4	0.0281	4	0.0416	4	0.0196	4	0.0416	4	0.0997	4	-0.0699
6	5	-1.096.9655	5	-1.096.9655	5	-360.5551	5	-1.096.9655	5	-1.096.9655	5	0.0281	5	0.0281	5	0.0416	5	0.0196	5	0.0416	5	0.0997	5	-0.0699
7	6	-1.096.9655	6	-1.096.9655	6	-360.5551	6	-1.096.9655	6	-1.096.9655	6	0.0281	6	0.0281	6	0.0416	6	0.0196	6	0.0416	6	0.0997	6	-0.0699
8	7	-1.096.9655	7	-1.096.9655	7	-360.5551	7	-1.096.9655	7	-1.096.9655	7	0.0281	7	0.0281	7	0.0416	7	0.0196	7	0.0416	7	0.0997	7	-0.0699
9	8	-1.096.9655	8	-1.096.9655	8	-360.5551	8	-1.096.9655	8	-1.096.9655	8	0.0281	8	0.0281	8	0.0416	8	0.0196	8	0.0416	8	0.0997	8	-0.0699
10	9	-1.096.9655	9	-1.096.9655	9	-360.5551	9	-1.096.9655	9	-1.096.9655	9	0.0281	9	0.0281	9	0.0416	9	0.0196	9	0.0416	9	0.0997	9	-0.0699
11	10	-1.096.9655	10	-1.096.9655	10	-360.5551	10	-1.096.9655	10	-1.096.9655	10	0.0281	10	0.0281	10	0.0416	10	0.0196	10	0.0416	10	0.0997	10	-0.0699
12	11	-1.096.9655	11	-1.096.9655	11	-360.5551	11	-1.096.9655	11	-1.096.9655	11	0.0281	11	0.0281	11	0.0416	11	0.0196	11	0.0416	11	0.0997	11	-0.0699
13	12	-1.096.9655	12	-1.096.9655	12	-360.5551	12	-1.096.9655	12	-1.096.9655	12	0.0281	12	0.0281	12	0.0416	12	0.0196	12	0.0416	12	0.0997	12	-0.0699
14	13	-1.096.9655	13	-1.096.9655	13	-360.5551	13	-1.096.9655	13	-1.096.9655	13	0.0281	13	0.0281	13	0.0416	13	0.0196	13	0.0416	13	0.0997	13	-0.0699
15	14	-1.096.9655	14	-1.096.9655	14	-360.5551	14	-1.096.9655	14	-1.096.9655	14	0.0281	14	0.0281	14	0.0416	14	0.0196	14	0.0416	14	0.0997	14	-0.0699
16	15	-1.096.9655	15	-1.096.9655	15	-360.5551	15	-1.096.9655	15	-1.096.9655	15	0.0281	15	0.0281	15	0.0416	15	0.0196	15	0.0416	15	0.0997	15	-0.0699
17	16	-1.096.9655	16	-1.096.9655	16	-360.5551	16	-1.096.9655	16	-1.096.9655	16	0.0281	16	0.0281	16	0.0416	16	0.0196	16	0.0416	16	0.0997	16	-0.0699
18	17	-1.096.9655	17	-1.096.9655	17	-360.5551	17	-1.096.9655	17	-1.096.9655	17	0.0281	17	0.0281	17	0.0416	17	0.0196	17	0.0416	17	0.0997	17	-0.0699
19	18	-1.096.9655	18	-1.096.9655	18	-360.5551	18	-1.096.9655	18	-1.096.9655	18	0.0281	18	0.0281	18	0.0416	18	0.0196	18	0.0416	18	0.0997	18	-0.0699
20	19	-1.096.9655	19	-1.096.9655	19	-360.5551	19	-1.096.9655	19	-1.096.9655	19	0.0281	19	0.0281	19	0.0416	19	0.0196	19	0.0416	19	0.0997	19	-0.0699
21	20	-1.096.9655	20	-1.096.9655	20	-360.5551	20	-1.096.9655	20	-1.096.9655	20	0.0281	20	0.0281	20	0.0416	20	0.0196	20	0.0416	20	0.0997	20	-0.0699
22	21	-1.096.9655	21	-1.096.9655	21	-360.5551	21	-1.096.9655	21	-1.096.9655	21	0.0281	21	0.0281	21	0.0416	21	0.0196	21	0.0416	21	0.0997	21	-0.0699
23	22	-1.096.9655	22	-1.096.9655	22	-360.5551	22	-1.096.9655	22	-1.096.9655	22	0.0281	22	0.0281	22	0.0416	22	0.0196	22	0.0416	22	0.0997	22	-0.0699
24	23	-1.096.9655	23	-1.096.9655	23	-360.5551	23	-1.096.9655	23	-1.096.9655	23	0.0281	23	0.0281	23	0.0416	23	0.0196	23	0.0416	23	0.0997	23	-0.0699
25	24	-1.096.9655	24	-1.096.9655	24	-360.5551	24	-1.096.9655	24	-1.096.9655	24	0.0281	24	0.0281	24	0.0416	24	0.0196	24	0.0416	24	0.0997	24	-0.0699
26	25	-1.096.9655	25	-1.096.9655	25	-360.5551	25	-1.096.9655	25	-1.096.9655	25	0.0281	25	0.0281	25	0.0416	25	0.0196	25	0.0416	25	0.0997	25	-0.0699
27	26	-1.096.9655	26	-1.096.9655	26	-360.5551	26	-1.096.9655	26	-1.096.9655	26	0.0281	26	0.0281	26	0.0416	26	0.0196	26	0.0416	26	0.0997	26	-0.0699
28	27	-1.096.9655	27	-1.096.9655	27	-360.5551	27	-1.096.9655	27	-1.096.9655	27	0.0281	27	0.0281	27	0.0416	27	0.0196	27	0.0416	27	0.0997	27	-0.0699
29	28	-1.096.9655	28	-1.096.9655	28	-360.5551	28	-1.096.9655	28	-1.096.9655	28	0.0281	28	0.0281	28	0.0416	28	0.0196	28	0.0416	28	0.0997	28	-0.0699
30	29	-1.096.9655	29	-1.096.9655	29	-360.5551	29	-1.096.9655	29	-1.096.9655	29	0.0281	29	0.0281	29	0.0416	29	0.0196	29	0.0416	29	0.0997	29	-0.0699
31	30	-1.096.9655	30	-1.096.9655	30	-360.5551	30	-1.096.9655	30	-1.096.9655	30	0.0281	30	0.0281	30	0.0416	30	0.0196	30	0.0416	30	0.0997	30	-0.0699
32	31	-1.096.9655	31	-1.096.9655	31	-360.5551	31	-1.096.9655	31	-1.096.9655	31	0.0281	31	0.0281	31	0.0416	31	0.0196	31	0.0416	31	0.0997	31	-0.0699
33	32	-1.096.9655	32	-1.096.9655	32	-360.5551	32	-1.096.9655	32	-1.096.9655	32	0.0281	32	0.0281	32	0.0416	32	0.0196	32	0.0416	32	0.0997	32	-0.0699
34	33	-1.096.9655	33	-1.096.9655	33	-360.5551	33	-1.096.9655	33	-1.096.9655	33	0.0281	33	0.0281	33	0.0416	33	0.0196	33	0.0416	33	0.0997	33	-0.0700
35	34	-1.096.9655	34	-1.096.9655	34	-360.5551	34	-1.096.9655	34	-1.096.9655	34	0.0281	34	0.0281	34	0.0416	34	0.0196	34	0.0416	34	0.0998	34	-0.0700
36	35	-1.096.9655	35	-1.096.9655	35	-360.5551	35	-1.096.9655	35	-1.096.9655	35	0.0281	35	0.0281	35	0.0417	35	0.0196	35	0.0417	35	0.0998	35	-0.0700
37	36	-1.096.9655	36	-1.096.9655	36	-360.5551	36	-1.096.9655	36	-1.096.9655	36	0.0282	36	0.0282	36	0.0417	36	0.0196	36	0.0417	36	0.0998	36	-0.0700
38	37	-1.096.9655	37	-1.096.9655	37	-360.5551	37	-1.096.9655	37	-1.096.9655	37	0.0282	37	0.0282	37	0.0417	37	0.0197	37	0.0417	37	0.0998	37	-0.0701
39	38	-1.096.9655	38	-1.096.9655	38	-360.5551	38	-1.096.9655	38	-1.096.9655	38	0.0282	38	0.0282	38	0.0417	38	0.0197	38	0.0417	38	0.0999	38	-0.0701
40	39	-1.096.9655	39	-1.096.9655	39	-360.5551	39	-1.096.9655	39	-1.096.9655	39	0.0282	39	0.0282	39	0.0417	39	0.0197	39	0.0417	39	0.0999	39	-0.0701
41	40	-1.112.3793	40	-1.112.3793	40	-365.6214	40	-1.112.3793	40	-1.112.3793	40	0.0286	40	0.0286	40	0.0423	40	0.0200	40	0.0423	40	0.1013	40	-0.0711
42	41	-1.131.0787	41	-1.131.0787	41	-371.7676	41	-1.131.0787	41	-1.131.0787	41	0.0291	41	0.0203	41	0.0430	41	0.0203	41	0.0430	41	0.1031	41	-0.0724

Figura 7-1. Fotografía hoja Excel de datos de entrada

8 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

En este último capítulo, se van a mostrar una serie de conclusiones al proyecto expuesto anteriormente, proponiendo al mismo tiempo una serie de mejoras que podrían realizarse en la red de laboratorio que harían más positivo su estudio y los ensayos realizados.

Las principales conclusiones en cuanto a los resultados obtenidos son que el modelado de la red se ajusta perfectamente a la red exacta y los resultados esperados se acercan mucho a la red original. Es por este motivo que vamos a considerar ambas redes completamente equivalentes, por lo que el objetivo de reproducir la red de baja tensión europea ha conseguido superarse.

En cuanto a las mejoras posibles a implantar en la red, se van a centrar en las limitaciones que existen actualmente y cuál sería la forma de proceder para establecer unas condiciones algo más óptimas.

En primer lugar, nos centraremos en los OLE que se encargan de emular las cargas. La mejora propuesta en este aspecto, consiste en instalar unos inversores que tengan una intensidad nominal mayor que los instalados. Esto permitiría emular unas cargas mayores y por lo tanto un perfil de carga con más variedad.

Otra medida a mejorar en la red, que sería una condición indispensable para realizar la explicada en el párrafo anterior, sería que los límites de intensidad de las líneas fuesen algo mayores. Para ello, la solución es instalar unas resistencias y reactancias que soporten una intensidad mayor, de tal forma que las cargas a emular no tuviesen la limitación de las líneas sobre las que estén. Esta limitación, también tiene muchas consecuencias en cuanto a las cargas simuladas, que no van a poder simularse en el caso de tener intensidades muy altas. Este hecho se pone de manifiesto sobre todo ante los desequilibrios más acentuados. La conclusión es que al cambiar las impedancias por unas que soporten una mayor intensidad, daría más flexibilidad a la red en cuanto al comportamiento frente a desequilibrios.

La siguiente medida propuesta para mejorar la red, es una solución en caso de no poder producirse ninguna de las anteriores, o como medida previa a la instalación de los nuevos inversores o impedancias. Esta mejora, consiste en modificar el perfil diario de carga, adecuándolo a las intensidades límites que tenemos en algunas de las ramas, sobretodo en el caso de la más limitante, la rama 12, que solo permite pasar 13 A. Partiendo de los datos de intensidades máximas se podría restablecer otro perfil de carga distinto que impidiese el aplanamiento que se produce en el mismo ante situaciones de extremo desequilibrio. Esta medida no ha podido llevarse a cabo en este proyecto por falta de tiempo disponible.

ANEXO A

Código	<i>RedEscala_definitiva24h.m</i>
Descripción	Con este código podemos simular un perfil de 24 h de la red de laboratorio y obtener las magnitudes de entrada para el funcionamiento de la red real de laboratorio.

```

clc
clear all
format long
%% DEFINICIÓN DE LA RED
%% Red de 12 nudos y 12 ramas
%% Datos de las ramas

%%%%%%%%%Descripción estructura "cable"
% cable = struct con información sobre los cables
% cable.tipo = información alfanumérica asociada al tipo de cable (aereo,
% subterráneo, etc)
% cable.impedancia = matriz de impedancias en Ohmios/km
%%%%%%%%%

%cable trafo

cable(1).tipo='TRAFO';
cable(1).impedancia=[0.0032+0.0128j 0+0j 0+0j 0+0j;
0+0j 0.0032+0.0128j 0+0j 0+0j;
0+0j 0+0j 0.0032+0.0128j 0+0j;
0+0j 0+0j 0+0j 0.0032+0.0128j];

%cables con acoplamientos y no equilibrados

cable(2).tipo='UG1';
cable(2).impedancia=[0.211+0.747j 0.049+0.673j 0.049+0.651j 0.049+0.673j;
0.049+0.673j 0.211+0.747j 0.049+0.673j 0.049+0.651j;
0.049+0.651j 0.049+0.673j 0.211+0.747j 0.049+0.673j;
0.049+0.673j 0.049+0.651j 0.049+0.673j 0.211+0.747j];

cable(3).tipo='UG3';
cable(3).impedancia=[0.871+0.797j 0.049+0.719j 0.049+0.697j 0.049+0.719j;
0.049+0.719j 0.871+0.797j 0.049+0.719j 0.049+0.697j;
0.049+0.697j 0.049+0.719j 0.871+0.797j 0.049+0.719j;
0.049+0.719j 0.049+0.697j 0.049+0.719j 0.871+0.797j];

%%%%%%%%%Descripción estructura "rama"
%Siendo i cada nudo de la red:
% rama = struct con información sobre las ramas
% rama(i).longitud = longitud de la rama en metros
% rama(i).cable = tipo de cable de la rama
% rama(i).padre = para cada rama su nudo padre
% rama(i).impedancia = Impedancia de la rama
% rama(i).imppropia = Impedancia propia de la rama (Zp): se supone la misma
% para las 3 fases
% rama(i).impmutua = Impedancia mutua de la rama (Zm): OJO: se supone la
% misma para las tres fases
% rama(i).I/I_FID/I_fil = intensidad por cada fase a, b, c y n de cada rama
% rama(i).Zdiag = Impedancia de la rama para calcular FID
% rama(i).FID/FID_fil = intensidad por las FID de cada rama
%%%%%%%%%

rama(1).cable='0'; %slack
rama(2).cable='TRAFO'; %el trafo mas el cable que hay detrás
rama(3).cable='UG1';
rama(4).cable='UG1';
rama(5).cable='UG1';

```

```

rama(6).cable='UG1';
rama(7).cable='UG1';
rama(8).cable='UG3';
rama(9).cable='UG3';
rama(10).cable='UG3';
rama(11).cable='UG3';
rama(12).cable='UG3';

%para asegurar las mismas caídas de tensión en la red real y la escalada
%utilizamos este factor de escala.
FEL=6;

rama(1).longitud=0;% slack
rama(2).longitud=1*FEL;%El trafo no tiene longitud pero usamos 1 para obtener la matriz original
de impedancias
rama(3).longitud=70*FEL;
rama(4).longitud=35*FEL;
rama(5).longitud=70*FEL;
rama(6).longitud=105*FEL;
rama(7).longitud=35*FEL;
rama(8).longitud=30*FEL;
rama(9).longitud=30*FEL;
rama(10).longitud=30*FEL;
rama(11).longitud=105*FEL;
rama(12).longitud=30*FEL;

rama(1).padre=0; %El nudo slack no tiene nudo padre.
rama(2).padre=1; %El trafo tiene nudo como padre el 1.
rama(3).padre=2;
rama(4).padre=3;
rama(5).padre=4;
rama(6).padre=5;
rama(7).padre=6;
rama(8).padre=7;
rama(9).padre=6;
rama(10).padre=5;
rama(11).padre=4;
rama(12).padre=3;

% Con el tipo de cable y longitud se calculan las impedancias

n_ramas=size(rama,2);

%Calculo la matriz de impedancias del trafo de la misma forma que los cables
rama(2).impedancia=cable(1).impedancia*rama(2).longitud;
rama(2).imppropia= rama(2).impedancia(1,1);
rama(2).impmutua= (rama(2).impedancia(1,2)+rama(2).impedancia(1,3)+rama(2).impedancia(1,4))/3;

for r=3:n_ramas %Omito el slack que siempre se enumera el primero
    if (rama(r).cable=='UG1')
        rama(r).impedancia=cable(2).impedancia*rama(r).longitud*1e-3;
    elseif (rama(r).cable=='UG3')
        rama(r).impedancia=cable(3).impedancia*rama(r).longitud*1e-3;
    end
    rama(r).imppropia= rama(r).impedancia(1,1);
    rama(r).impmutua=
    (rama(r).impedancia(1,2)+rama(r).impedancia(1,3)+rama(r).impedancia(1,4))/3;
end

%% Datos de los nudos

n_nudos=n_ramas;

%%%%%%%%%Descripción estructura "nudo"
% Siendo i cada nudo de la red
% nudo(i).tension/tension_fil = tension de cada fase a,b,c y n para cada nudo
% nudo(i).Scarga = potencia aparente S monofasica en cada fase a,b y c
% nudo(i).FPcarga = factor de potencia de la carga monofasica en cada fase a,b y c
% nudo(i).Pcarga = carga P monofasica en cada fase a,b y c
% nudo(i).Qcarga = carga Q monofasica en cada fase a,b y c
% nudo(i).Icarga/Icarga_FID/Icarga_fil = intensidad I por cada carga conectada a cada nudo
% nudo(i).Ineutrocarga/Ineutrocarga_FID/Ineutrocarga_fil= intensidad I por el neutro de la carga
entrando en el
% neutro
% nudo(i).Iacumulada/Iacumulada_FID/Iacumulada_fil = intensidad acumulada en el nudo procedente
de todas las
% intensidades que parten de ese nudo aguas abajo y para cada fase a, b, c
% y n

```

```

% nudo(i).FIDacum/FIDacum_fil = valor de la FID total acumulada en el nudo
% nudo(i).tension/tension_FID/tension_fil = valor de la tensión en cada nudo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%CONSUMOS

%cargamos los distintos tipos de curvas de carga desde un archivo
consumo = xlsread('Graficas_consumo.xlsx');

resid = consumo(2, :)/100; % es el valor en porcentaje del consumo con respecto a la potencia
total disponible
indus = consumo(3, :)/100;
comer = consumo(4, :)/100;
%seleccionamos aquí el tipo de consumo que queremos estudiar
tipocons=resid;

for t=1:length(tipocons) % termina donde dejamos de usar las 't'
    %POTENCIAS cargas
    for l=1:7
        Scarga(l,t)=0*tipocons(t); % los nudos sin cargas conectadas
    end
    Scarga(8,t)=52*tipocons(t); % Potencia aparente de la carga total trifasica en cada nudo en
kVA
    Scarga(9,t)=47*tipocons(t);
    Scarga(10,t)=55*tipocons(t);
    Scarga(11,t)=35*tipocons(t);
    Scarga(12,t)=15*2*tipocons(t);
    %fin POTENCIAS cargas
    %I max y min ramas
    for i=1:n_nudos
        Imax(i)=100000;
    end
    Imax(8)=40; %Límite convertidor
    Imax(9)=35;%Límite linea
    Imax(10)=40;%Límite convertidor
    Imax(11)=30;%Límite linea
    Imax(12)=13;%Límite linea

    Smin=FEL*5*sqrt(3)*400/1000;

    for q=8:12
        if Scarga(q,t)<Smin
            Scarga(q,t)=Smin;
        end
    end
    %fin I max y min ramas

    %dividimos potencias entre el factor de escala FEL
    Scarga(:,t)=Scarga(:,t)/FEL;
    %FP
    for l=1:12
        if l<=7
            FPcarga(l)=0; % los nudos sin cargas conectadas
        elseif l>7 && l<=12
            FPcarga(l)=0.95; % Factor de potencia de la carga total en cada nudo
        end
    end
    %fin FP
    for n=1:n_nudos
        nudo(n).Scarga(1:3,t)=0.0;
        nudo(n).FPcarga(1:3,t)=0.0;
        nudo(n).Pcarga(1:3,t)=0.0;
        nudo(n).Qcarga(1:3,t)=0.0;
    end

%DESEQUILIBRIOS

for n=1:n_nudos %a=33.33%, b=33.33% c=33.33%
    nudo(n).Scarga(1,t)=Scarga(n,t)/3;
    nudo(n).Scarga(2,t)=Scarga(n,t)/3;
    nudo(n).Scarga(3,t)=Scarga(n,t)/3;
    nudo(n).FPcarga(1,t)=FPcarga(n);
    nudo(n).FPcarga(2,t)=FPcarga(n);
    nudo(n).FPcarga(3,t)=FPcarga(n);
    nudo(n).Pcarga(:,t)=nudo(n).Scarga(:,t).*(nudo(n).FPcarga(:,t));
    nudo(n).Qcarga(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t).*tan(acos(nudo(n).FPcarga(:,t)));
end

```

```

%         for n=1:n_nudos %a=40%, b=30% c=30%
%         nudo(n).Scarga(1,t)=Scarga(n,t)*0.40;
%         nudo(n).Scarga(2,t)=Scarga(n,t)*0.30;
%         nudo(n).Scarga(3,t)=Scarga(n,t)*0.30;
%         nudo(n).FPcarga(1,t)=FPcarga(n);
%         nudo(n).FPcarga(2,t)=FPcarga(n);
%         nudo(n).FPcarga(3,t)=FPcarga(n);
%         nudo(n).Pcarga(:,t)=nudo(n).Scarga(:,t).*(nudo(n).FPcarga(:,t));
%         nudo(n).Qcarga(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t).*tan(acos(nudo(n).FPcarga(:,t)));
%     end

%     for n=1:n_nudos %a=50%, b=30% c=20%
%     nudo(n).Scarga(1,t)=Scarga(n,t)*0.50;
%     nudo(n).Scarga(2,t)=Scarga(n,t)*0.30;
%     nudo(n).Scarga(3,t)=Scarga(n,t)*0.20;
%     nudo(n).FPcarga(1,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).FPcarga(2,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).FPcarga(3,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).Pcarga(:,t)=nudo(n).Scarga(:,t).*(nudo(n).FPcarga(:,t));
%     nudo(n).Qcarga(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t).*tan(acos(nudo(n).FPcarga(:,t)));
% end

%     for n=1:n_nudos %a=60%, b=30% c=10%
%     nudo(n).Scarga(1,t)=Scarga(n,t)*0.60;
%     nudo(n).Scarga(2,t)=Scarga(n,t)*0.30;
%     nudo(n).Scarga(3,t)=Scarga(n,t)*0.10;
%     nudo(n).FPcarga(1,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).FPcarga(2,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).FPcarga(3,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).Pcarga(:,t)=nudo(n).Scarga(:,t).*(nudo(n).FPcarga(:,t));
%     nudo(n).Qcarga(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t).*tan(acos(nudo(n).FPcarga(:,t)));
% end

%     for n=1:n_nudos %a=70%, b=30% c=0%
%     nudo(n).Scarga(1,t)=Scarga(n,t)*0.70;
%     nudo(n).Scarga(2,t)=Scarga(n,t)*0.30;
%     nudo(n).Scarga(3,t)=Scarga(n,t)*0.00;
%     nudo(n).FPcarga(1,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).FPcarga(2,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).FPcarga(3,t)=FPcarga(n);
%     nudo(n).Pcarga(:,t)=nudo(n).Scarga(:,t).*(nudo(n).FPcarga(:,t));
%     nudo(n).Qcarga(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t).*tan(acos(nudo(n).FPcarga(:,t)));
% end

%fin DESEQUILIBRIOS

%% CÁLCULOS RED
%% FLUJO DE CARGAS: Barrido árbol (exacto)
%TENSIONES

%vector a
vector_a=cos(120*pi/180)+j*sin(120*pi/180);

PVT=1; %Porcentaje Variación Tensión:0.95, 1, 1.05
Vslack=((400)/sqrt(3))*PVT; %secuencia directa "U1"

for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension(:,t)=[1;1*vector_a*vector_a;1*vector_a;0].*(Vslack); % fasores abc de
tension
end
%fin TENSIONES
for r=1:n_ramas
    nudo(r).Iacumulada(1:4,t)=0.0; % creo la matriz de Iacumulada
end

%IMPEDANCIAS ramas
for i=n_nudos:-1:2 % Crear matriz de impedancias puramente diagonal con Zp-Zm en cada fase
    zeta_pm=zeros(4);
    for j=1:4
        if j==4 && i==2 %excepción: en el caso del neutro del trafo la Zp-Zm es nula
            zeta_pm(j,j)=0.0;
        else
            zeta_pm(j,j)=(rama(i).imppropia-rama(i).impmutua);
        end
    end
    rama(i).Zdiag= zeta_pm;
end
%fin IMPEDANCIAS ramas

```



```

%PROCESO ITERATIVO
old_tension=[nudo(1).tension(:,t)];
for n=2:n_nudos
    old_tension=[old_tension; nudo(n).tension(:,t)];
end

residuo=max(abs(old_tension));
num_iter=0;
while (residuo >=0.00001)
    num_iter=num_iter+1;

    % Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
    for n=n_nudos:-1:2
        tension_abc_menos_neutro=nudo(n).tension(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension(4,t);
        nudo(n).Icarga(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro)'.'); % I=(S/U)*
        nudo(n).Ineutrocarga(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t)+[nudo(n).Icarga(:,t);nudo(n).Ineutrocarga(1,t)]
;
        %a la acumulada que ya hubiera le sumo esta nueva contribución
        rama(n).I(:,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t); %toda la Iacumulada que llevemos es la que va
a pasar por la rama correspondiente
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)+ rama(n).I(:,t);
%me voy al nudo padre de la rama y le sumo lo que he obtenido

        %segun esto, en cada nudo voy a tener sumadas todas las intensidades
        %que llegan desde todos lados
    end

    % Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
    tension=[nudo(1).tension(:,t)];
    Vnudo_a(1,t)=[nudo(1).tension(1,t)];
    Vnudo_b(1,t)=[nudo(1).tension(2,t)];
    Vnudo_c(1,t)=[nudo(1).tension(3,t)];
    Vnudo_n(1,t)=[nudo(1).tension(4,t)];
    nudo(1).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0]; % la hacemos ya 0 para la proxima iteración
    for n=2:n_nudos
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(n).tension(:,t)=nudo(nudo_padre).tension(:,t)-rama(n).impedancia*rama(n).I(:,t);
        tension=[tension; nudo(n).tension(:,t)];
        Vnudo_a(n,t)=nudo(n).tension(1,t);
        Vnudo_b(n,t)=nudo(n).tension(2,t);
        Vnudo_c(n,t)=nudo(n).tension(3,t);
        Vnudo_n(n,t)=nudo(n).tension(4,t);
        nudo(n).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0];
    end
    diferencia=abs(old_tension)-abs(tension);
    residuo=max(abs(diferencia));
    old_tension=tension;
end
%fin PROCESO ITERATIVO

%INTENSIDADES ramas
% lo volvemos a calcular porque hemos borrado la Iacum
for n=n_nudos:-1:2 %este for es identico al proceso iterativo
    tension_abc_menos_neutro=nudo(n).tension(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension(4,t);
    nudo(n).Icarga(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro)'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t)+[nudo(n).Icarga(:,t);nudo(n).Ineutrocarga(1,t)]
;
    %a la acumulada que ya hubiera le sumo esta nueva contribución
    rama(n).I(:,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t); %toda la Iacumulada que llevemos es la que va a
pasar por la rama correspondiente
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)+ rama(n).I(:,t); %me
voy al nudo padre de la rama y le sumo lo que he obtenido

    %segun esto, en cada nudo voy a tener sumadas todas las intensidades
    %que llegan desde todos lados
end
rama(1).I(:,t)=nudo(1).Iacumulada(:,t);
%fin INTENSIDADES ramas

```

```

%POTENCIA cedida
%cedida por el sistema
Scede_slack(:,t)=(nudo(1).tension(:,t)).'*rama(1).I(:,t)')/1000; %kVA ;S=(I*U)*
Pced(t)=real(sum(Scede_slack(:,t))); %kW
Qced(t)=imag(sum(Scede_slack(:,t))); %kVAr
%fin POTENCIA cedida
%POTENCIA cargas
for n=1:n_nudos
    CargasP_a(n,t)=nudo(n).Pcarga(1,t);
    CargasP_b(n,t)=nudo(n).Pcarga(2,t);
    CargasP_c(n,t)=nudo(n).Pcarga(3,t);
    CargasQ_a(n,t)=nudo(n).Qcarga(1,t);
    CargasQ_b(n,t)=nudo(n).Qcarga(2,t);
    CargasQ_c(n,t)=nudo(n).Qcarga(3,t);
end
Sumadecargas(1,t)=sum(CargasP_a(:,t))+sum(CargasQ_a(:,t))*1i;
Sumadecargas(2,t)= sum(CargasP_b(:,t))+sum(CargasQ_b(:,t))*1i;
Sumadecargas(3,t)= sum(CargasP_c(:,t))+sum(CargasQ_c(:,t))*1i;
P_total(t)=real(sum(Sumadecargas(:,t)));
Q_total(t)=imag(sum(Sumadecargas(:,t)));
%fin POTENCIA cargas
%PÉRDIDAS
Ploss_total(t)=real(Scede_slack(:,t)-sum(Sumadecargas(:,t))); %kW
Qloss_total(t)=imag(Scede_slack(:,t)-sum(Sumadecargas(:,t))); %kVAr
%fin PÉRDIDAS

%% FLUJO DE CARGAS: Barrido árbol (con FID)

% TENSIONES
for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension_FID(1:4,t)=0.0; %creo la matriz de tensiones
end
for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension_FID(:,t)=[1;1*vector_a*vector_a;1*vector_a;0].*(Vslack); % fasores abc de
tension
end

%fin TENSIONES
for r=1:n_ramas
    nudo(r).Iacumulada_FID(1:4,t)=0.0; % igualo la Iacum con la de la FID
end

%CÁLCULO de las FID
for n=1:n_nudos
    nudo(n).FIDacum(1:4,t)=0.0+0.0*1i;
end
for n=n_nudos:-1:2
    zeta=rama(n).impedancia;
    for b=1:4
        zeta(b,b)=rama(n).impmutua;
    end
    zeta=zeta/(rama(n).imppropia-rama(n).impmutua);
    rama(n).FID(:,t)=zeta*rama(n).I(:,t);
    %traslación de fuentes
    no=rama(n).padre; %nudo origen de la rama
    nf=n; %nudo final de la rama
    nudo(nf).FIDacum(1:3,t)= nudo(nf).FIDacum(1:3,t)-rama(n).FID(1:3,t); %la FID de las fases
a,b,c sale por el nudo final
    nudo(nf).FIDacum(4,t)= nudo(nf).FIDacum(4,t)+sum(rama(n).FID(1:3,t))-
sum(rama(n).FID(1:4,t)); % y las 3 entran en el neutro+ todas sumadas en el neutro
    nudo(no).FIDacum(1:3,t)=nudo(no).FIDacum(1:3,t)+rama(n).FID(1:3,t); %la FID de las fases
a,b,c entra por el nudo origen
    nudo(no).FIDacum(4,t)= nudo(no).FIDacum(4,t)-
sum(rama(n).FID(1:3,t))+sum(rama(n).FID(1:4,t)); % y las 3 salen del neutro
end
% fin CÁLCULO de las FID

%PROCESO ITERATIVO: muy similar al anterior pero añadiendo las FID
old_tension_FID=[nudo(1).tension_FID(:,t)];
for n=2:n_nudos
    old_tension_FID=[old_tension_FID; nudo(n).tension_FID(:,t)];
end

residuo_FID=max(abs(old_tension_FID));
num_iter_FID=0;
while (residuo_FID >=0.00001)
    num_iter_FID=num_iter_FID+1;

    % Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas

```

```

    for n=n_nodos:-1:2
        tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-
[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
        nudo(n).Icarga_FID(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./(tension_abc_menos_neutro_FID)'.'); % I=(S/U)*
        nudo(n).Ineutrocarga_FID(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_FID(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_FID(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)+[nudo(n).Icarga_FID(:,t);nudo(n).Ineutr
ocarga_FID(1,t)]-nudo(n).FIDacum(:,t);
        rama(n).I_FID(:,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t);
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)+
rama(n).I_FID(:,t);
    end

    % Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
    tension_FID=[nudo(1).tension_FID(:,t)];
    Vnudo_a_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(1,t)];
    Vnudo_b_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(2,t)];
    Vnudo_c_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(3,t)];
    Vnudo_n_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(4,t)];
    nudo(1).Iacumulada_FID(:,t)=[0;0;0;0]; %para la proxima iteración
    for n=2:n_nodos
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(n).tension_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).tension_FID(:,t)-
rama(n).Zdiag*rama(n).I_FID(:,t);
        tension_FID=[tension_FID; nudo(n).tension_FID(:,t)];
        Vnudo_a_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(1,t);
        Vnudo_b_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(2,t);
        Vnudo_c_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(3,t);
        Vnudo_n_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(4,t);
        nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)=[0;0;0;0];
    end
    diferencia_FID=abs(old_tension_FID)-abs(tension_FID);
    residuo_FID=max(abs(diferencia_FID));
    old_tension_FID=tension_FID;
end
%fin PROCESO ITERATIVO

%INTENSIDADES ramas
% lo volvemos a calcular porque hemos borrado la Iacum
for n=n_nodos:-1:2
    tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-
[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
    nudo(n).Icarga_FID(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./(tension_abc_menos_neutro_FID)'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga_FID(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_FID(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_FID(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)+[nudo(n).Icarga_FID(:,t);nudo(n).Ineutr
ocarga_FID(1,t)]-nudo(n).FIDacum(:,t);
    rama(n).I_FID(:,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t);
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)+
rama(n).I_FID(:,t);
end
rama(1).I_FID(:,t)=nudo(1).Iacumulada_FID(:,t);
%fin INTENSIDADES por las ramas

%POTENCIA cedida
Scede_slack_FID(:,t)=(nudo(1).tension_FID(:,t)).'*rama(1).I_FID(:,t)'.')/1000; % kVA
Pced_FID(t)=real(sum(Scede_slack_FID(:,t))); %kW
Qced_FID(t)=imag(sum(Scede_slack_FID(:,t))); %kVAr
%fin POTENCIA cedida
%los valores de las cargas son los mismos que los calculados antes
%POTENCIAS FID
for n=2:n_nodos
    tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
    CargasFID_a(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(1)).'*nudo(n).FIDacum(1,t)'.')/1000;
    CargasFID_b(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(2)).'*nudo(n).FIDacum(2,t)'.')/1000;
    CargasFID_c(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(3)).'*nudo(n).FIDacum(3,t)'.')/1000;
    % en este caso hay que añadir las cargas del neutro
    nudo_padre=rama(n).padre;
    CargasFID_n(n,t)=(nudo(nudo_padre).tension_FID(4,t)-
nudo(n).tension_FID(4,t)).'*sum(rama(n).FID(1:4,t))'.')/1000;
end
SumadeFID(1,t)=sum(CargasFID_a(:,t));
SumadeFID(2,t)=sum(CargasFID_b(:,t));
SumadeFID(3,t)=sum(CargasFID_c(:,t));

```

```

SumadeFID(4,t)=sum(CargasFID_n(:,t));
P_FID(t)=real(sum(SumadeFID(:,t)));
Q_FID(t)=imag(sum(SumadeFID(:,t)));
%fin POTENCIAS FID
%PÉRDIDAS
Pced_tot_FID(t)=Pced_FID(t)+P_FID(t);
Qced_tot_FID(t)=Qced_FID(t)+Q_FID(t);
Ploss_total_FID(t)=real(Scede_slack_FID(:,t)+sum(SumadeFID(:,t))-sum(Sumadecargas(:,t))); %kW
Qloss_total_FID(t)=imag(Scede_slack_FID(:,t)+sum(SumadeFID(:,t))-sum(Sumadecargas(:,t)));
%kVar
%fin PÉRDIDAS
%delta TENSIONES
for n=1:n_nudos
    DeltaVa(n,t)=abs(Vnudo_a_FID(n,t))-abs(Vnudo_a(n,t));
    DeltaVb(n,t)=abs(Vnudo_b_FID(n,t))-abs(Vnudo_b(n,t));
    DeltaVc(n,t)=abs(Vnudo_c_FID(n,t))-abs(Vnudo_c(n,t));
    DeltaVn(n,t)=abs(Vnudo_n_FID(n,t))-abs(Vnudo_n(n,t));
end
%delta PÉRDIDAS
DeltaPloss(t)=Ploss_total_FID(t)-Ploss_total(t);
DeltaQloss(t)=Qloss_total_FID(t)-Qloss_total(t);

%% FLUJO DE CARGAS: Barrido del árbol con filtro

enable_2vuelta=1; %en esta variable habilito/deshabilito la segunda vuelta
enable_filtro_min=1; %en esta variable habilito/deshabilito el filtro de X Amperios
enable_filtro_max=1; %en esta variable habilito/deshabilito el filtro de Imax
%Filtro técnico: todas las intensidad menores que X las vamos a poner
%iguales a X
X=4.5; %Amperios
%realmente es 5 A pero ponemos algo menos para que también se
%consideeren esos valores entre 4.5 y 5 que en realidad si se pueden
%simular con los inversores

%TENSIONES
for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension_fil(1:4,t)=0.0; %creo la matriz de tensiones
end

for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension_fil(:,t)=[1;1*vector_a*vector_a;1*vector_a;0].*(Vslack); % fasores abc de
tension
end

%fin TENSIONES
for r=1:n_ramas
    nudo(r).Iacumulada_fil(1:4,t)=0.0;
end
%Calculo FID (copio las de antes) y anulo las del nudo 3:7
for n=n_nudos:-1:2
    nudo(n).FIDacum_fil(:,t)=nudo(n).FIDacum(:,t);
end
%anulo las FID de los nudos origen de las ramas de las cargas (por esta razon las tensiones
van a ser ligeramente distintas)
for n=3:7
    nudo(n).FIDacum_fil(:,t)=0.0;
end
%fin Calculo FID

%almaceno los valores de P y Q en otra variable (con el filtro la carga va a ser diferente)
for n=1:n_nudos
    nudo(n).Pcarga_fil(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t);
    nudo(n).Qcarga_fil(:,t)=nudo(n).Qcarga(:,t);
end
%PROCESO ITERATIVO
old_tension_fil=[nudo(1).tension_fil(:,t)];
for n=2:n_nudos
    old_tension_fil=[old_tension_fil; nudo(n).tension_fil(:,t)];
end
residuo_fil=max(abs(old_tension_fil));
num_iter_fil=0;
while (residuo_fil >=0.00001)
    num_iter_fil=num_iter_fil+1;
    %Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
    for n=n_nudos:-1:2
        tension_abc_menos_neutro_fil=nudo(n).tension_fil(1:3,t)-
[1;1;1]*nudo(n).tension_fil(4,t);
        nudo(n).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*

```

```

nudo(n).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_fil(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(n).Icarga_fil(:,t);nudo(n).Ineutro
ocarga_fil(1,t)]-nudo(n).FIDacum_fil(:,t);

if enable_filtro_min==1
%elimino las cargas que proporcionen las intensidades menores
%que la X
for f=1:3
flag=0;
if abs(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))<X
nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).FIDacum_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).Icarga_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=0.0;
nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=0.0;
flag=1;
end
if flag==1
nudo(n).Iacumulada_fil(4,t)=-sum(nudo(n).Iacumulada_fil(1:3,t));
nudo(n).Ineutrocarga_fil(f,t)=-sum(nudo(n).Icarga_fil(1:3,t));
end
end

if enable_filtro_max==1
%compruebo que ninguna intensidad se pasa del máximo. En el
%caso de pasarse, voy a ir disminuyendo un 1 % la carga del
%nudo correspondiente
for f=1:3
i=1;
while(real(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))>Imax(n))
i=i-0.01;
nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=nudo(n).Pcarga_fil(f,t)*i;
nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=nudo(n).Qcarga_fil(f,t)*i;

%vuelvo a calcular las intensidades
for nn=n_nodos:-1:2
nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)=0.0;
end
for nn=n_nodos:-1:2
nudo(nn).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(nn).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(nn).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
nudo(nn).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(nn).Icarga_fil(:,t)); %-
In=Ia+Ib+Ic

nudo(nn).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(nn).Icarga_fil(:,t);nudo(nn).In
eutrocarga_fil(1,t)]-nudo(nn).FIDacum_fil(:,t);
rama(nn).I_fil(:,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t);
nudo_padre=rama(nn).padre;

nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+ rama(nn).I_fil(:,t);
end
end
end

rama(n).I_fil(:,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t);
nudo_padre=rama(n).padre;
nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+
rama(n).I_fil(:,t);
end

% Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
tension_fil=[nudo(1).tension_fil(:,t)];
Vnudo_a_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(1,t)];
Vnudo_b_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(2,t)];
Vnudo_c_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(3,t)];
Vnudo_n_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(4,t)];
nudo(1).Iacumulada_fil(:,t)=[0;0;0;0]; %para la proxima iteración
for n=2:n_nodos
nudo_padre=rama(n).padre;
nudo(n).tension_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).tension_fil(:,t)-
rama(n).Zdiag*rama(n).I_fil(:,t);
tension_fil=[tension_fil; nudo(n).tension_fil(:,t)];
Vnudo_a_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(1,t);
Vnudo_b_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(2,t);
Vnudo_c_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(3,t);

```

```

        Vnudo_n_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(4,t);
        nudo(n).Iacumulada_fil(:,t)=[0;0;0;0];
    end
    diferencia_fil=abs(old_tension_fil)-abs(tension_fil);
    residuo_fil=max(abs(diferencia_fil));
    old_tension_fil=tension_fil;
end
%fin PROCESO ITERATIVO

%INTENSIDADES por cada rama
% lo volvemos a calcular porque hemos borrado la Iacum
for n=n_nudos:-1:2
    tension_abc_menos_neutro_fil=nudo(n).tension_fil(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_fil(4,t);
    nudo(n).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_fil(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(n).Icarga_fil(:,t);nudo(n).Ineutro
carga_fil(1,t)]-nudo(n).FIDacum_fil(:,t);

    if enable_filtro_min==1
        %elimino las cargas que proporcionen las intensidades menores
        %que la X
        for f=1:3
            flag=0;
            if abs(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))<X
                nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).FIDacum_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).Icarga_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=0.0;
                flag=1;
            end
            if flag==1
                nudo(n).Iacumulada_fil(4,t)=-sum(nudo(n).Iacumulada_fil(1:3,t));
                nudo(n).Ineutrocarga_fil(f,t)=-sum(nudo(n).Icarga_fil(1:3,t));
            end
        end
    end

    if enable_filtro_max==1
        %compruebo que ninguna intensidad se pasa del máximo. En el
        %caso de pasarse, voy a ir disminuyendo un 1 % la carga del
        %nudo correspondiente
        for f=1:3
            i=1;
            while(real(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)>Imax(n)))
                i=i-0.01;
                nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=nudo(n).Pcarga_fil(f,t)*i;
                nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=nudo(n).Qcarga_fil(f,t)*i;

                %vuelvo a calcular las intensidades
                for nn=n_nudos:-1:2
                    nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)=0.0;
                end
                for nn=n_nudos:-1:2
                    nudo(nn).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(nn).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(nn).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
                    nudo(nn).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(nn).Icarga_fil(:,t)); %-
In=Ia+Ib+Ic

nudo(nn).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(nn).Icarga_fil(:,t);nudo(nn).Ineutro
carga_fil(1,t)]-nudo(nn).FIDacum_fil(:,t);
                    rama(nn).I_fil(:,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t);
                    nudo_padre=rama(nn).padre;

nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+ rama(nn).I_fil(:,t);
                    end
                end
            end
        end

        rama(n).I_fil(:,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t);
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+
rama(n).I_fil(:,t);
    end
    rama(1).I_fil(:,t)=nudo(1).Iacumulada_fil(:,t);
    %POTENCIA cedida

```

```

Scede_slack_fil(:,t)=(nudo(1).tension_fil(:,t)).'*rama(1).I_fil(:,t)')/1000; % kVA
Pced_fil(t)=real(sum(Scede_slack_fil(:,t))); %kW
Qced_fil(t)=imag(sum(Scede_slack_fil(:,t))); %kVAr
%fin POTENCIA cedida
%POTENCIAS FID
for n=2:n_nudos
    tension_abc_menos_neutro_fil=nudo(n).tension_fil(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_fil(4,t);

CargasFID_a_fil(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_fil(1)).'*nudo(n).FIDacum_fil(1,t)')/1000;

CargasFID_b_fil(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_fil(2)).'*nudo(n).FIDacum_fil(2,t)')/1000;

CargasFID_c_fil(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_fil(3)).'*nudo(n).FIDacum_fil(3,t)')/1000;
    %recordemos que no hay FID en el neutro
end
SumadeFID_fil(1,t)=sum(CargasFID_a_fil(:,t));
SumadeFID_fil(2,t)=sum(CargasFID_b_fil(:,t));
SumadeFID_fil(3,t)=sum(CargasFID_c_fil(:,t));
P_FID_fil(t)=real(sum(SumadeFID_fil(:,t)));
Q_FID_fil(t)=imag(sum(SumadeFID_fil(:,t)));
%fin POTENCIAS FID
%POTENCIA cargas
for n=1:n_nudos
    CargasP_a_fil(n,t)=nudo(n).Pcarga_fil(1,t);
    CargasP_b_fil(n,t)=nudo(n).Pcarga_fil(2,t);
    CargasP_c_fil(n,t)=nudo(n).Pcarga_fil(3,t);
    CargasQ_a_fil(n,t)=nudo(n).Qcarga_fil(1,t);
    CargasQ_b_fil(n,t)=nudo(n).Qcarga_fil(2,t);
    CargasQ_c_fil(n,t)=nudo(n).Qcarga_fil(3,t);
end
Sumadecargas_fil(1,t)=sum(CargasP_a_fil(:,t))+sum(CargasQ_a_fil(:,t))*1i;
Sumadecargas_fil(2,t)= sum(CargasP_b_fil(:,t))+sum(CargasQ_b_fil(:,t))*1i;
Sumadecargas_fil(3,t)= sum(CargasP_c_fil(:,t))+sum(CargasQ_c_fil(:,t))*1i;
P_total_fil(t)=real(sum(Sumadecargas_fil(:,t)));
Q_total_fil(t)=imag(sum(Sumadecargas_fil(:,t)));
%fin POTENCIA cargas
%PÉRDIDAS
Pced_tot_fil(t)=Pced_fil(t)+P_FID_fil(t);
Qced_tot_fil(t)=Qced_fil(t)+Q_FID_fil(t);
Ploss_total_fil(t)=real(Scede_slack_fil(:,t)+sum(SumadeFID_fil(:,t))-
sum(Sumadecargas_fil(:,t))); %kW
Qloss_total_fil(t)=imag(Scede_slack_fil(:,t)+sum(SumadeFID_fil(:,t))-
sum(Sumadecargas_fil(:,t))); %kVAr
%fin PÉRDIDAS

%delta TENSIONES
for n=1:n_nudos
    DeltaVa_fil(n,t)=abs(Vnudo_a_fil(n,t))-abs(Vnudo_a(n,t));
    DeltaVb_fil(n,t)=abs(Vnudo_b_fil(n,t))-abs(Vnudo_b(n,t));
    DeltaVc_fil(n,t)=abs(Vnudo_c_fil(n,t))-abs(Vnudo_c(n,t));
    DeltaVn_fil(n,t)=abs(Vnudo_n_fil(n,t))-abs(Vnudo_n(n,t));
end
%delta PÉRDIDAS
DeltaPloss_fil(t)=Ploss_total_fil(t)-Ploss_total(t);
DeltaQloss_fil(t)=Qloss_total_fil(t)-Qloss_total(t);

if enable_2vuelta==1
    % al haber modificado los valores de las potencias, es necesario
    % recalcular de nuevo la red en el caso exacto para poder
    % compararlos correctamente. Del mismo modo se volvera a calcular de
    % nuevo este último caso porque se van a modificar las FID
    %% FLUJO DE CARGAS: Barrido árbol 2.0 (exacto)
    for n=1:n_nudos
        nudo(n).Pcarga(:,t)=nudo(n).Pcarga_fil(:,t);
        nudo(n).Qcarga(:,t)=nudo(n).Qcarga_fil(:,t);
    end
    %TENSIONES
    for n=1:n_nudos
        nudo(n).tension(1:4,t)=0.0; %creo la matriz de tensiones
    end
    for n=1:n_nudos
        nudo(n).tension(:,t)=[1;1*vector_a*vector_a;1*vector_a;0].*(Vslack); % fasores abc de
tension
    end
    %fin TENSIONES
    for r=1:n_ramas
        nudo(r).Iacumulada(1:4,t)=0.0; % creo la matriz de Iacumulada
    end
end

```

```

%PROCESO ITERATIVO
old_tension=[nudo(1).tension(:,t)];
for n=2:n_nodos
    old_tension=[old_tension; nudo(n).tension(:,t)];
end

residuo=max(abs(old_tension));
num_iter=0;
while (residuo >=0.00001)
    num_iter=num_iter+1;

    % Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
    for n=n_nodos:-1:2
        tension_abc_menos_neutro=nudo(n).tension(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension(4,t);
        nudo(n).Icarga(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro)'.'); % I=(S/U)*
        nudo(n).Ineutrocarga(1,t)=-sum(nudo(n).Icarga(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t)+[nudo(n).Icarga(:,t);nudo(n).Ineutrocarga(1,t)]
;
        %a la acumulada que ya hubiera le sumo esta nueva contribución
        rama(n).I(:,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t); %toda la Iacumulada que llevemos es la que va
a pasar por la rama correspondiente
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)+ rama(n).I(:,t);
%me voy al nudo padre de la rama y le sumo lo que he obtenido

        %segun esto, en cada nudo voy a tener sumadas todas las intensidades
        %que llegan desde todos lados
    end

    % Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
    tension=[nudo(1).tension(:,t)];
    Vnudo_a(1,t)=[nudo(1).tension(1,t)];
    Vnudo_b(1,t)=[nudo(1).tension(2,t)];
    Vnudo_c(1,t)=[nudo(1).tension(3,t)];
    Vnudo_n(1,t)=[nudo(1).tension(4,t)];
    nudo(1).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0]; % la hacemos ya 0 para la proxima iteración
    for n=2:n_nodos
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(n).tension(:,t)=nudo(nudo_padre).tension(:,t)-rama(n).impedancia*rama(n).I(:,t);
        tension=[tension; nudo(n).tension(:,t)];
        Vnudo_a(n,t)=nudo(n).tension(1,t);
        Vnudo_b(n,t)=nudo(n).tension(2,t);
        Vnudo_c(n,t)=nudo(n).tension(3,t);
        Vnudo_n(n,t)=nudo(n).tension(4,t);
        nudo(n).Iacumulada(:,t)=[0;0;0;0];
    end
    diferencia=abs(old_tension)-abs(tension);
    residuo=max(abs(diferencia));
    old_tension=tension;
end
%fin PROCESO ITERATIVO

%INTENSIDADES por cada rama

% lo volvemos a calcular porque hemos borrado la Iacum
for n=n_nodos:-1:2 %este for es identico al del proceso iterativo
    tension_abc_menos_neutro=nudo(n).tension(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension(4,t);
    nudo(n).Icarga(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro)'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga(1,t)=-sum(nudo(n).Icarga(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t)+[nudo(n).Icarga(:,t);nudo(n).Ineutrocarga(1,t)]
;
    %a la acumulada que ya hubiera le sumo esta nueva contribución
    rama(n).I(:,t)=nudo(n).Iacumulada(:,t); %toda la Iacumulada que llevemos es la que va a
pasar por la rama correspondiente
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada(:,t)+ rama(n).I(:,t); %me
voy al nudo padre de la rama y le sumo lo que he obtenido

    %segun esto, en cada nudo voy a tener sumadas todas las intensidades
    %que llegan desde todos lados
end
rama(1).I(:,t)=nudo(1).Iacumulada(:,t);
%fin INTENSIDADES por las ramas

```



```

%POTENCIA cedida
%cedida por el sistema
Scede_slack(:,t)=(nudo(1).tension(:,t)).'*rama(1).I(:,t)')/1000; %kVA, S=(I*U)*
Pced(t)=real(sum(Scede_slack(:,t))); %kW
Qced(t)=imag(sum(Scede_slack(:,t))); %kVAr
%fin POTENCIA cedida
%POTENCIA cargas
for n=1:n_nudos
    CargasP_a(n,t)=nudo(n).Pcarga(1,t);
    CargasP_b(n,t)=nudo(n).Pcarga(2,t);
    CargasP_c(n,t)=nudo(n).Pcarga(3,t);
    CargasQ_a(n,t)=nudo(n).Qcarga(1,t);
    CargasQ_b(n,t)=nudo(n).Qcarga(2,t);
    CargasQ_c(n,t)=nudo(n).Qcarga(3,t);
end
Sumadecargas(1,t)=sum(CargasP_a(:,t))+sum(CargasQ_a(:,t))*1i;
Sumadecargas(2,t)= sum(CargasP_b(:,t))+sum(CargasQ_b(:,t))*1i;
Sumadecargas(3,t)= sum(CargasP_c(:,t))+sum(CargasQ_c(:,t))*1i;
P_total(t)=real(sum(Sumadecargas(:,t)));
Q_total(t)=imag(sum(Sumadecargas(:,t)));
%fin POTENCIA cargas
%PÉRDIDAS
Ploss_total(t)=real(Scede_slack(:,t)-sum(Sumadecargas(:,t))); %kW
Qloss_total(t)=imag(Scede_slack(:,t)-sum(Sumadecargas(:,t)));%kVAr
%fin PÉRDIDAS

%% FLUJO DE CARGAS: Barrido árbol 2.0(con FID)

% TENSIONES
for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension_FID(1:4,t)=0.0; %creo la matriz de tensiones
end
for n=1:n_nudos
    nudo(n).tension_FID(:,t)=[1;1*vector_a*vector_a;1*vector_a;0].*(Vslack); % fasores abc de
tension
end
%fin TENSIONES
for r=1:n_ramas
    nudo(r).Iacumulada_FID(1:4,t)=0.0; % igualo la Iacum con la de la FID
end

%CÁLCULO de las FID (hay que volver a calcularla porque ha cambiado la I)
for n=1:n_nudos
    nudo(n).FIDacum(1:4,t)=0.0+0.0*1i;
end
for n=n_nudos:-1:2
    zeta=rama(n).impedancia;
    for b=1:4
        zeta(b,b)=rama(n).impmutua;
    end
    zeta=zeta/(rama(n).imppropia-rama(n).impmutua);
    rama(n).FID(:,t)=zeta*rama(n).I(:,t);
    %traslación de fuentes
    no=rama(n).padre; %nudo origen de la rama
    nf=n; %nudo final de la rama
    nudo(nf).FIDacum(1:3,t)= nudo(nf).FIDacum(1:3,t)-rama(n).FID(1:3,t); %la FID de las fases
a,b,c sale por el nudo final
    nudo(nf).FIDacum(4,t)= nudo(nf).FIDacum(4,t)+sum(rama(n).FID(1:3,t))-
sum(rama(n).FID(1:4,t)); % y las 3 entran en el neutro+ todas sumadas en el neutro
    nudo(no).FIDacum(1:3,t)=nudo(no).FIDacum(1:3,t)+rama(n).FID(1:3,t); %la FID de las fases
a,b,c entra por el nudo final
    nudo(no).FIDacum(4,t)= nudo(no).FIDacum(4,t)-
sum(rama(n).FID(1:3,t))+sum(rama(n).FID(1:4,t)); % y las 3 salen del neutro
end
% fin CÁLCULO de las FID
%PROCESO ITERATIVO: muy similar al anterior pero añadiendo las FID
old_tension_FID=[nudo(1).tension_FID(:,t)];
for n=2:n_nudos
    old_tension_FID=[old_tension_FID; nudo(n).tension_FID(:,t)];
end

residuo_FID=max(abs(old_tension_FID));
num_iter_FID=0;
while (residuo_FID >=0.00001)
    num_iter_FID=num_iter_FID+1;

    % Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
    for n=n_nudos:-1:2

```

```

        tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-
[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
        nudo(n).Icarga_FID(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_FID)'.'); % I=(S/U)*
        nudo(n).Ineutrocarga_FID(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_FID(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_FID(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)+[nudo(n).Icarga_FID(:,t);nudo(n).Ineutro
ocarga_FID(1,t)]-nudo(n).FIDacum(:,t);
        rama(n).I_FID(:,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t);
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)+
rama(n).I_FID(:,t);
    end

    % Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
    tension_FID=[nudo(1).tension_FID(:,t)];
    Vnudo_a_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(1,t)];
    Vnudo_b_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(2,t)];
    Vnudo_c_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(3,t)];
    Vnudo_n_FID(1,t)=[nudo(1).tension_FID(4,t)];
    nudo(1).Iacumulada_FID(:,t)=[0;0;0;0]; %para la proxima iteración
    for n=2:n_nudos
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(n).tension_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).tension_FID(:,t)-
rama(n).Zdiag*rama(n).I_FID(:,t);
        tension_FID=[tension_FID; nudo(n).tension_FID(:,t)];
        Vnudo_a_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(1,t);
        Vnudo_b_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(2,t);
        Vnudo_c_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(3,t);
        Vnudo_n_FID(n,t)=nudo(n).tension_FID(4,t);
        nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)=[0;0;0;0];
    end
    diferencia_FID=abs(old_tension_FID)-abs(tension_FID);
    residuo_FID=max(abs(diferencia_FID));
    old_tension_FID=tension_FID;
end
%fin PROCESO ITERATIVO

%INTENSIDADES por cada rama
% lo volvemos a calcular porque hemos borrado la Iacum
for n=n_nudos:-1:2
    tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-
[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
    nudo(n).Icarga_FID(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_FID)'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga_FID(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_FID(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_FID(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t)+[nudo(n).Icarga_FID(:,t);nudo(n).Ineutro
ocarga_FID(1,t)]-nudo(n).FIDacum(:,t);
    rama(n).I_FID(:,t)=nudo(n).Iacumulada_FID(:,t);
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_FID(:,t)+
rama(n).I_FID(:,t);
end
rama(1).I_FID(:,t)=nudo(1).Iacumulada_FID(:,t);
%fin INTENSIDADES por las ramas

%POTENCIA cedida
Scede_slack_FID(:,t)=(nudo(1).tension_FID(:,t).'*rama(1).I_FID(:,t)')/1000; % kVA
Pced_FID(t)=real(sum(Scede_slack_FID(:,t))); %kW
Qced_FID(t)=imag(sum(Scede_slack_FID(:,t))); %kVAR
%fin POTENCIA cedida
%los valores de las cargas son los mismos que los calculados antes
%POTENCIAS FID
for n=2:n_nudos
    tension_abc_menos_neutro_FID=nudo(n).tension_FID(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_FID(4,t);
    CargasFID_a(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(1).'*nudo(n).FIDacum(1,t)')/1000;
    CargasFID_b(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(2).'*nudo(n).FIDacum(2,t)')/1000;
    CargasFID_c(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_FID(3).'*nudo(n).FIDacum(3,t)')/1000;
    % en este caso hay que añadir las cargas del neutro
    nudo_padre=rama(n).padre;
    CargasFID_n(n,t)=(nudo(nudo_padre).tension_FID(4,t)-
nudo(n).tension_FID(4,t)).'* (sum(rama(n).FID(1:4,t)))')/1000;
end
SumadeFID(1,t)=sum(CargasFID_a(:,t));
SumadeFID(2,t)=sum(CargasFID_b(:,t));
SumadeFID(3,t)=sum(CargasFID_c(:,t));
SumadeFID(4,t)=sum(CargasFID_n(:,t));
P_FID(t)=real(sum(SumadeFID(:,t)));

```

```

Q_FID(t)=imag(sum(SumadeFID(:,t)));
%fin POTENCIAS FID
%PÉRDIDAS
Pced_tot_FID(t)=Pced_FID(t)+P_FID(t);
Qced_tot_FID(t)=Qced_FID(t)+Q_FID(t);
Ploss_total_FID(t)=real(Scede_slack_FID(:,t)+sum(SumadeFID(:,t))-sum(Sumadecargas(:,t))); %kW
Qloss_total_FID(t)=imag(Scede_slack_FID(:,t)+sum(SumadeFID(:,t))-sum(Sumadecargas(:,t)));
%kVar
%fin PÉRDIDAS
%delta TENSIONES
for n=1:n_nodos
    DeltaVa(n,t)=abs(Vnudo_a_FID(n,t))-abs(Vnudo_a(n,t));
    DeltaVb(n,t)=abs(Vnudo_b_FID(n,t))-abs(Vnudo_b(n,t));
    DeltaVc(n,t)=abs(Vnudo_c_FID(n,t))-abs(Vnudo_c(n,t));
    DeltaVn(n,t)=abs(Vnudo_n_FID(n,t))-abs(Vnudo_n(n,t));
end
%delta PÉRDIDAS
DeltaPloss(t)=Ploss_total_FID(t)-Ploss_total(t);
DeltaQloss(t)=Qloss_total_FID(t)-Qloss_total(t);

%% FLUJO DE CARGAS: Barrido del árbol con filtro 2.0

%TENSIONES
for n=1:n_nodos
    nudo(n).tension_fil(1:4,t)=0.0; %creo la matriz de tensiones
end

for n=1:n_nodos
    nudo(n).tension_fil(:,t)=[1;1*vector_a*vector_a;1*vector_a;0].*(Vslack); % fasores abc de
tension
end
%fin TENSIONES
for r=1:n_ramas
    nudo(r).Iacumulada_fil(1:4,t)=0.0;
end

%Calculo FID (copio las de antes) y anulo las del nudo 3:7
for n=n_nodos:-1:2
    nudo(n).FIDacum_fil(:,t)=nudo(n).FIDacum(:,t);
end
%anulo las FID de los nudos origen de las ramas de las cargas (por esta razon las tensiones
van a ser ligeramente distintas)
for n=3:7
    nudo(n).FIDacum_fil(:,t)=0.0;
end
%fin Calculo FID

%almaceno los valores de P y Q en otra variable (con el filtro la carga va a ser diferente)
for n=1:n_nodos
    nudo(n).Pcarga_fil(:,t)=nudo(n).Pcarga(:,t);
    nudo(n).Qcarga_fil(:,t)=nudo(n).Qcarga(:,t);
end
%PROCESO ITERATIVO
old_tension_fil=[nudo(1).tension_fil(:,t)];
for n=2:n_nodos
    old_tension_fil=[old_tension_fil; nudo(n).tension_fil(:,t)];
end
residuo_fil=max(abs(old_tension_fil));
num_iter_fil=0;
while (residuo_fil >=0.00001)
    num_iter_fil=num_iter_fil+1;
    %Barrido aguas arriba: intensidades por las ramas
    for n=n_nodos:-1:2
        tension_abc_menos_neutro_fil=nudo(n).tension_fil(1:3,t)-
[1;1;1]*nudo(n).tension_fil(4,t);
        nudo(n).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
        nudo(n).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_fil(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

nudo(n).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(n).Icarga_fil(:,t);nudo(n).Ineutr
ocarga_fil(1,t)]-nudo(n).FIDacum_fil(:,t);

        if enable_filtro_min==1
            for f=1:3
                flag=0;
                if abs(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))<X
                    nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)=0.0;
                    nudo(n).FIDacum_fil(f,t)=0.0;

```

```

        nudo(n).Icarga_fil(f,t)=0.0;
        nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=0.0;
        nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=0.0;
        flag=1;
    end
    if flag==1
        nudo(n).Iacumulada_fil(4,t)=-sum(nudo(n).Iacumulada_fil(1:3,t));
        nudo(n).Ineutrocarga_fil(f,t)=-sum(nudo(n).Icarga_fil(1:3,t));
    end
end
end

if enable_filtro_max==1
    for f=1:3
        i=1;
        while(real(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)>Imax(n)))
            i=i-0.01;
            nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=nudo(n).Pcarga_fil(f,t)*i;
            nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=nudo(n).Qcarga_fil(f,t)*i;

            %vuelvo a calcular las intensidades
            for nn=n_nudos:-1:2
                nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)=0.0;
            end
            for nn=n_nudos:-1:2
                nudo(nn).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(nn).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(nn).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
                nudo(nn).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(nn).Icarga_fil(:,t)); %-
In=Ia+Ib+Ic

nudo(nn).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(nn).Icarga_fil(:,t);nudo(nn).In
eutrocarga_fil(1,t)]-nudo(nn).FIDacum_fil(:,t);
                rama(nn).I_fil(:,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t);
                nudo_padre=rama(nn).padre;

nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+ rama(nn).I_fil(:,t);
            end
        end
    end
end

rama(n).I_fil(:,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t);
nudo_padre=rama(n).padre;
nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+
rama(n).I_fil(:,t);
end

% Barrido aguas abajo: tensiones en los nudos
tension_fil=[nudo(1).tension_fil(:,t)];
Vnudo_a_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(1,t)];
Vnudo_b_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(2,t)];
Vnudo_c_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(3,t)];
Vnudo_n_fil(1,t)=[nudo(1).tension_fil(4,t)];
nudo(1).Iacumulada_fil(:,t)=[0;0;0;0]; %para la proxima iteración
for n=2:n_nudos
    nudo_padre=rama(n).padre;
    nudo(n).tension_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).tension_fil(:,t)-
rama(n).Zdiag*rama(n).I_fil(:,t);
    tension_fil=[tension_fil; nudo(n).tension_fil(:,t)];
    Vnudo_a_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(1,t);
    Vnudo_b_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(2,t);
    Vnudo_c_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(3,t);
    Vnudo_n_fil(n,t)=nudo(n).tension_fil(4,t);
    nudo(n).Iacumulada_fil(:,t)=[0;0;0;0];
end
diferencia_fil=abs(old_tension_fil)-abs(tension_fil);
residuo_fil=max(abs(diferencia_fil));
old_tension_fil=tension_fil;
end
%fin PROCESO ITERATIVO

%INTENSIDADES ramas
% lo volvemos a calcular porque hemos borrado la Iacum
for n=n_nudos:-1:2
    tension_abc_menos_neutro_fil=nudo(n).tension_fil(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_fil(4,t);
    nudo(n).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(n).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(n).Qcarga_fil(:,t))./((tension_abc_menos_neutro_fil)'.'); % I=(S/U)*
    nudo(n).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(n).Icarga_fil(:,t)); %-In=Ia+Ib+Ic

```

```

nudo(n).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(n).Icarga_fil(:,t);nudo(n).Ineutro
ocarga_fil(1,t)]-nudo(n).FIDacum_fil(:,t);

    if enable_filtro_min==1
        for f=1:3
            flag=0;
            if abs(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))<X
                nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).FIDacum_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).Icarga_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=0.0;
                nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=0.0;
                flag=1;
            end
            if flag==1
                nudo(n).Iacumulada_fil(4,t)=-sum(nudo(n).Iacumulada_fil(1:3,t));
                nudo(n).Ineutrocarga_fil(f,t)=-sum(nudo(n).Icarga_fil(1:3,t));
            end
        end
    end

    if enable_filtro_max==1
        for f=1:3
            i=1;
            while(real(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t))>Imax(n))
                i=i-0.001;
                nudo(n).Pcarga_fil(f,t)=nudo(n).Pcarga_fil(f,t)*i;
                nudo(n).Qcarga_fil(f,t)=nudo(n).Qcarga_fil(f,t)*i;

                %vuelvo a calcular las intensidades
                for nn=n_nudos:-1:2
                    nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)=0.0;
                end
                for nn=n_nudos:-1:2
                    nudo(nn).Icarga_fil(1:3,t)=1e3*(nudo(nn).Pcarga_fil(:,t)-
1i*nudo(nn).Qcarga_fil(:,t))./(tension_abc_menos_neutro_fil'.'); % I=(S/U)*
                    nudo(nn).Ineutrocarga_fil(1,t)= -sum(nudo(nn).Icarga_fil(:,t)); %-
In=Ia+Ib+Ic

nudo(nn).Iacumulada_fil(1:4,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t)+[nudo(nn).Icarga_fil(:,t);nudo(nn).In
eutrocarga_fil(1,t)]-nudo(nn).FIDacum_fil(:,t);
                    rama(nn).I_fil(:,t)=nudo(nn).Iacumulada_fil(:,t);
                    nudo_padre=rama(nn).padre;

nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+ rama(nn).I_fil(:,t);
                    end
                end
            end
        end

        rama(n).I_fil(:,t)=nudo(n).Iacumulada_fil(:,t);
        nudo_padre=rama(n).padre;
        nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)=nudo(nudo_padre).Iacumulada_fil(:,t)+
rama(n).I_fil(:,t);
    end
    rama(1).I_fil(:,t)=nudo(1).Iacumulada_fil(:,t);
    %POTENCIA cedida
    Scede_slack_fil(:,t)=(nudo(1).tension_fil(:,t).'*rama(1).I_fil(:,t)')/1000; % kVA
    Pced_fil(t)=real(sum(Scede_slack_fil(:,t))); %kW
    Qced_fil(t)=imag(sum(Scede_slack_fil(:,t))); %kVAr
    %fin POTENCIA cedida
    %POTENCIAS FID
    for n=2:n_nudos
        tension_abc_menos_neutro_fil=nudo(n).tension_fil(1:3,t)-[1;1;1]*nudo(n).tension_fil(4,t);

CargasFID_a_fil(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_fil(1).'*nudo(n).FIDacum_fil(1,t)')/1000;

CargasFID_b_fil(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_fil(2).'*nudo(n).FIDacum_fil(2,t)')/1000;

CargasFID_c_fil(n,t)=(tension_abc_menos_neutro_fil(3).'*nudo(n).FIDacum_fil(3,t)')/1000;
    end
    SumadeFID_fil(1,t)=sum(CargasFID_a_fil(:,t));
    SumadeFID_fil(2,t)=sum(CargasFID_b_fil(:,t));
    SumadeFID_fil(3,t)=sum(CargasFID_c_fil(:,t));
    P_FID_fil(t)=real(sum(SumadeFID_fil(:,t)));
    Q_FID_fil(t)=imag(sum(SumadeFID_fil(:,t)));

```

```

%fin POTENCIAS FID
%POTENCIA cargas
for n=1:n_nudos
    CargasP_a_fil(n,t)=nudo(n).Pcarga_fil(1,t);
    CargasP_b_fil(n,t)=nudo(n).Pcarga_fil(2,t);
    CargasP_c_fil(n,t)=nudo(n).Pcarga_fil(3,t);
    CargasQ_a_fil(n,t)=nudo(n).Qcarga_fil(1,t);
    CargasQ_b_fil(n,t)=nudo(n).Qcarga_fil(2,t);
    CargasQ_c_fil(n,t)=nudo(n).Qcarga_fil(3,t);
end
Sumadecargas_fil(1,t)=sum(CargasP_a_fil(:,t))+sum(CargasQ_a_fil(:,t))*1i;
Sumadecargas_fil(2,t)= sum(CargasP_b_fil(:,t))+sum(CargasQ_b_fil(:,t))*1i;
Sumadecargas_fil(3,t)= sum(CargasP_c_fil(:,t))+sum(CargasQ_c_fil(:,t))*1i;
P_total_fil(t)=real(sum(Sumadecargas_fil(:,t)));
Q_total_fil(t)=imag(sum(Sumadecargas_fil(:,t)));
%fin POTENCIA cargas
%PÉRDIDAS
Pced_tot_fil(t)=Pced_fil(t)+P_FID_fil(t);
Qced_tot_fil(t)=Qced_fil(t)+Q_FID_fil(t);
Ploss_total_fil(t)=real(Scede_slack_fil(:,t)+sum(SumadeFID_fil(:,t))-
sum(Sumadecargas_fil(:,t))); %kW
Qloss_total_fil(t)=imag(Scede_slack_fil(:,t)+sum(SumadeFID_fil(:,t))-
sum(Sumadecargas_fil(:,t))); %kVar
%fin PÉRDIDAS

%delta TENSIONES
for n=1:n_nudos
    DeltaVa_fil(n,t)=abs(Vnudo_a_fil(n,t))-abs(Vnudo_a(n,t));
    DeltaVb_fil(n,t)=abs(Vnudo_b_fil(n,t))-abs(Vnudo_b(n,t));
    DeltaVc_fil(n,t)=abs(Vnudo_c_fil(n,t))-abs(Vnudo_c(n,t));
    DeltaVn_fil(n,t)=abs(Vnudo_n_fil(n,t))-abs(Vnudo_n(n,t));
end
%delta PÉRDIDAS
DeltaPloss_fil(t)=Ploss_total_fil(t)-Ploss_total(t);
DeltaQloss_fil(t)=Qloss_total_fil(t)-Qloss_total(t);
end
% Sacar los datos de excel
for n=n_nudos:-1:2
    for f=1:4

[nudo(n).Iacumulada_fil_ang(f,t),nudo(n).Iacumulada_fil_mod(f,t)]=cart2pol(real(nudo(n).Iacumulad
a_fil(f,t)),imag(nudo(n).Iacumulada_fil(f,t)));

[nudo(n).tension_fil_ang(f,t),nudo(n).tension_fil_mod(f,t)]=cart2pol(real(nudo(n).tension_fil(f,t
)),imag(nudo(n).tension_fil(f,t)));
nudo(n).Iacumulada_ang_new(f,t)=nudo(n).Iacumulada_fil_ang(f,t)-
nudo(n).tension_fil_ang(f,t);
[Ir,Ix]=pol2cart(nudo(n).Iacumulada_ang_new(f,t),nudo(n).Iacumulada_fil_mod(f,t));
nudo(n).Iacumulada_refVnudo(f,t)=Ir+1i*Ix;
end
end
end

%% Intensidades por las ramas

% por las RAMAS exacto
Rama_Ia_acum(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_Ib_acum(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_Ic_acum(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_In_acum(1:n_nudos,t)=0.0;

for n=1:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        Rama_Ia_acum(n,t)=abs(rama(n).I(1,t));
        Rama_Ib_acum(n,t)=abs(rama(n).I(2,t));
        Rama_Ic_acum(n,t)=abs(rama(n).I(3,t));
        Rama_In_acum(n,t)=abs(rama(n).I(4,t));
    end
end

% por las RAMAS con FID
Rama_Ia_acum_FID(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_Ib_acum_FID(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_Ic_acum_FID(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_In_acum_FID(1:n_nudos,t)=0.0;

for n=1:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        Rama_Ia_acum_FID(n,t)=abs(rama(n).I_FID(1,t));

```

```

        Rama_Ib_acum_FID(n,t)=abs(rama(n).I_FID(2,t));
        Rama_Ic_acum_FID(n,t)=abs(rama(n).I_FID(3,t));
        Rama_In_acum_FID(n,t)=abs(rama(n).I_FID(4,t));
    end
end

% por las RAMAS con filtro
Rama_Ia_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_Ib_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_Ic_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;
Rama_In_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;

for n=1:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        Rama_Ia_acum_fil(n,t)=abs(rama(n).I_fil(1,t));
        Rama_Ib_acum_fil(n,t)=abs(rama(n).I_fil(2,t));
        Rama_Ic_acum_fil(n,t)=abs(rama(n).I_fil(3,t));
        Rama_In_acum_fil(n,t)=abs(rama(n).I_fil(4,t));
    end
end

% por los ACOPLAMIENTOS exacto
Nudo_FIDa_acum(1:n_nudos,t)=0.0;
Nudo_FIDb_acum(1:n_nudos,t)=0.0;
Nudo_FIDc_acum(1:n_nudos,t)=0.0;
Nudo_FIDn_acum(1:n_nudos,t)=0.0;

for n=2:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        Nudo_FIDa_acum(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum(1,t));
        Nudo_FIDb_acum(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum(2,t));
        Nudo_FIDc_acum(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum(3,t));
        Nudo_FIDn_acum(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum(4,t));
    end
end

% por los ACOPLAMIENTOS con filtro
Nudo_FIDa_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;
Nudo_FIDb_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;
Nudo_FIDc_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;
Nudo_FIDn_acum_fil(1:n_nudos,t)=0.0;

for n=2:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        Nudo_FIDa_acum_fil(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum_fil(1,t));
        Nudo_FIDb_acum_fil(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum_fil(2,t));
        Nudo_FIDc_acum_fil(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum_fil(3,t));
        Nudo_FIDn_acum_fil(n,t)=abs(nudo(n).FIDacum_fil(4,t));
    end
end

% %valor de la suma de las FID que quedan en el neutro tras la traslación
SumaFIDneutro(1:n_nudos,t)=0.0;

for n=2:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        SumaFIDneutro(n,t)=abs(sum(rama(n).FID(1:4,t)));
    end
end

%Intensidades referidas a la tension de su nudo
Ira(1:n_nudos,t)=0.0;
Irb(1:n_nudos,t)=0.0;
Irc(1:n_nudos,t)=0.0;
Irn(1:n_nudos,t)=0.0;

Ixa(1:n_nudos,t)=0.0;
Ixb(1:n_nudos,t)=0.0;
Ixc(1:n_nudos,t)=0.0;
Ixn(1:n_nudos,t)=0.0;
% format short
for n=2:n_nudos
    for t=1:length(tipocons)
        Ira(n,t)=real(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(1,t));
        Irb(n,t)=real(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(2,t));
        Irc(n,t)=real(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(3,t));
        Irn(n,t)=real(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(4,t));
    end
end

```

```

        Ixa(n,t)=imag(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(1,t));
        Ixb(n,t)=imag(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(2,t));
        Ixc(n,t)=imag(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(3,t));
        Ixn(n,t)=imag(nudo(n).Iacumulada_refVnudo(4,t));
    end
end
Ira=Ira';
Irb=Irb';
Irc=Irc';
Irn=Irn';

Ixa=Ixa';
Ixb=Ixb';
Ixc=Ixc';
Ixn=Ixn';
%pensar bien mañana
%P y Q de las FID con filtro
P_a_fil=(CargasP_a_fil')*1000;
Q_a_fil=(CargasQ_a_fil')*1000;
P_b_fil=(CargasP_b_fil')*1000;
Q_b_fil=(CargasQ_b_fil')*1000;
P_c_fil=(CargasP_c_fil')*1000;
Q_c_fil=(CargasQ_c_fil')*1000;

% EXCEL
%VSC1: Potencias FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_a_fil(:,2),'VSC1','B2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_a_fil(:,2),'VSC1','D2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_b_fil(:,2),'VSC1','F2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_b_fil(:,2),'VSC1','H2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_c_fil(:,2),'VSC1','J2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_c_fil(:,2),'VSC1','L2')
%VSC1: Intensidades FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ira(:,2),'VSC1','N2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixa(:,2),'VSC1','P2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irb(:,2),'VSC1','R2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixb(:,2),'VSC1','T2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irc(:,2),'VSC1','V2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixc(:,2),'VSC1','X2')

%VSC2: Potencias FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_a_fil(:,8),'VSC2','B2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_a_fil(:,8),'VSC2','D2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_b_fil(:,8),'VSC2','F2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_b_fil(:,8),'VSC2','H2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_c_fil(:,8),'VSC2','J2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_c_fil(:,8),'VSC2','L2')
%VSC2: Intensidades FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ira(:,8),'VSC2','N2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixa(:,8),'VSC2','P2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irb(:,8),'VSC2','R2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixb(:,8),'VSC2','T2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irc(:,8),'VSC2','V2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixc(:,8),'VSC2','X2')

%VSC3: Potencias FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_a_fil(:,9),'VSC3','B2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_a_fil(:,9),'VSC3','D2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_b_fil(:,9),'VSC3','F2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_b_fil(:,9),'VSC3','H2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_c_fil(:,9),'VSC3','J2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_c_fil(:,9),'VSC3','L2')
%VSC3: Intensidades FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ira(:,9),'VSC3','N2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixa(:,9),'VSC3','P2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irb(:,9),'VSC3','R2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixb(:,9),'VSC3','T2')

```



```

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irc(:,9),'VSC3','V2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixc(:,9),'VSC3','X2')

%VSC4: Potencias FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_a_fil(:,10),'VSC4','B2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_a_fil(:,10),'VSC4','D2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_b_fil(:,10),'VSC4','F2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_b_fil(:,10),'VSC4','H2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_c_fil(:,10),'VSC4','J2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_c_fil(:,10),'VSC4','L2')
%VSC4: Intensidades FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ira(:,10),'VSC4','N2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixa(:,10),'VSC4','P2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irb(:,10),'VSC4','R2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixb(:,10),'VSC4','T2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irc(:,10),'VSC4','V2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixc(:,10),'VSC4','X2')

%VSC5: Potencias FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_a_fil(:,11),'VSC5','B2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_a_fil(:,11),'VSC5','D2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_b_fil(:,11),'VSC5','F2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_b_fil(:,11),'VSC5','H2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_c_fil(:,11),'VSC5','J2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_c_fil(:,11),'VSC5','L2')
%VSC5: Intensidades FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ira(:,11),'VSC5','N2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixa(:,11),'VSC5','P2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irb(:,11),'VSC5','R2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixb(:,11),'VSC5','T2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irc(:,11),'VSC5','V2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixc(:,11),'VSC5','X2')

%VSC6: Potencias FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_a_fil(:,12),'VSC6','B2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_a_fil(:,12),'VSC6','D2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_b_fil(:,12),'VSC6','F2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_b_fil(:,12),'VSC6','H2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',P_c_fil(:,12),'VSC6','J2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Q_c_fil(:,12),'VSC6','L2')
%VSC6: Intensidades FID
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ira(:,12),'VSC6','N2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixa(:,12),'VSC6','P2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irb(:,12),'VSC6','R2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixb(:,12),'VSC6','T2')

xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Irc(:,12),'VSC6','V2')
xlswrite('DATOS_REDBT_modif2.xlsx',Ixc(:,12),'VSC6','X2')

%% PLOTS TENSIONES
grid on
%% exacto

figure(1)
subplot(3,1,1) %tensiones en fase_a en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(1,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(2,:))...
,(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(3,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(4,:))...
,(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(5,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(6,:))...
,(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(7,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(8,:))...
,(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(9,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(10,:))...
,(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(11,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a(12,:)),'linewidth',2)
ylabel('FASE a')
title('Tensiones en nudos exacto')
legend('|Va-n1|','|Va-n2|','|Va-n3|','|Va-n4|','|Va-n5|','|Va-n6|'...
,'|Va-n7|','|Va-n8|','|Va-n9|','|Va-n10|','|Va-n11|','|Va-n12|')
subplot(3,1,2) %tensiones en fase_b en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(1,:)),(0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(2,:))...

```

```

    (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(4,:)) ...
    (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(6,:)) ...
    (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(8,:)) ...
    (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(10,:)) ...
    (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE b')
legend('|Vb-n1|','|Vb-n2|','|Vb-n3|','|Vb-n4|','|Vb-n5|','|Vb-n6|'...
      '|Vb-n7|','|Vb-n8|','|Vb-n9|','|Vb-n10|','|Vb-n11|','|Vb-n12|')
subplot(3,1,3) %tensiones en fase_c en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(2,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(4,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(6,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(8,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(10,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|Vc-n1|','|Vc-n2|','|Vc-n3|','|Vc-n4|','|Vc-n5|','|Vc-n6|'...
      '|Vc-n7|','|Vc-n8|','|Vc-n9|','|Vc-n10|','|Vc-n11|','|Vc-n12|')

figure(2) %tensiones en fase_n en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(2,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(4,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(6,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(8,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(10,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE n')
xlabel('hora')
title('Tensiones en el neutro exacto')
legend('|Vn-n1|','|Vn-n2|','|Vn-n3|','|Vn-n4|','|Vn-n5|','|Vn-n6|'...
      '|Vn-n7|','|Vn-n8|','|Vn-n9|','|Vn-n10|','|Vn-n11|','|Vn-n12|')

%% con FID

figure(3)
subplot(3,1,1) %tensiones en fase_a en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(2,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(4,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(6,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(8,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(10,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_FID(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE a')
title('Tensiones en nudos con FID')
legend('|Va-n1|','|Va-n2|','|Va-n3|','|Va-n4|','|Va-n5|','|Va-n6|'...
      '|Va-n7|','|Va-n8|','|Va-n9|','|Va-n10|','|Va-n11|','|Va-n12|')
subplot(3,1,2) %tensiones en fase_b en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(2,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(4,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(6,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(8,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(10,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_FID(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE b')
legend('|Vb-n1|','|Vb-n2|','|Vb-n3|','|Vb-n4|','|Vb-n5|','|Vb-n6|'...
      '|Vb-n7|','|Vb-n8|','|Vb-n9|','|Vb-n10|','|Vb-n11|','|Vb-n12|')
subplot(3,1,3) %tensiones en fase_c en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(2,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(4,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(6,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(8,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(10,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_FID(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|Vc-n1|','|Vc-n2|','|Vc-n3|','|Vc-n4|','|Vc-n5|','|Vc-n6|'...
      '|Vc-n7|','|Vc-n8|','|Vc-n9|','|Vc-n10|','|Vc-n11|','|Vc-n12|')

figure(4) %tensiones en fase_n en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(2,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(4,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(6,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(8,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(10,:)) ...
      (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_FID(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE n')
xlabel('hora')
title('Tensiones en el neutro con FID')

```

```

legend('|Vn-n1|', '|Vn-n2|', '|Vn-n3|', '|Vn-n4|', '|Vn-n5|', '|Vn-n6|'...
      , '|Vn-n7|', '|Vn-n8|', '|Vn-n9|', '|Vn-n10|', '|Vn-n11|', '|Vn-n12|')

%% con filtro

figure(5)
subplot(3,1,1) %tensiones en fase_a en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(2,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(4,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(6,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(8,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(10,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_a_fil(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE a')
title('Tensiones en nudos con filtro')
legend('|Va-n1|', '|Va-n2|', '|Va-n3|', '|Va-n4|', '|Va-n5|', '|Va-n6|'...
      , '|Va-n7|', '|Va-n8|', '|Va-n9|', '|Va-n10|', '|Va-n11|', '|Va-n12|')
subplot(3,1,2) %tensiones en fase_b en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(2,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(4,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(6,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(8,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(10,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_b_fil(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE b')
legend('|Vb-n1|', '|Vb-n2|', '|Vb-n3|', '|Vb-n4|', '|Vb-n5|', '|Vb-n6|'...
      , '|Vb-n7|', '|Vb-n8|', '|Vb-n9|', '|Vb-n10|', '|Vb-n11|', '|Vb-n12|')
subplot(3,1,3) %tensiones en fase_c en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(2,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(4,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(6,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(8,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(10,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_c_fil(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|Vc-n1|', '|Vc-n2|', '|Vc-n3|', '|Vc-n4|', '|Vc-n5|', '|Vc-n6|'...
      , '|Vc-n7|', '|Vc-n8|', '|Vc-n9|', '|Vc-n10|', '|Vc-n11|', '|Vc-n12|')

figure(6) %tensiones en fase_n en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(1,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(2,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(3,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(4,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(5,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(6,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(7,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(8,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(9,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(10,:))...
      , (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(11,:)), (0:0.25:23.75),abs(Vnudo_n_fil(12,:)), 'linewidth',2)
ylabel('FASE n')
xlabel('hora')
title('Tensiones en el neutro con filtro')
legend('|Vn-n1|', '|Vn-n2|', '|Vn-n3|', '|Vn-n4|', '|Vn-n5|', '|Vn-n6|'...
      , '|Vn-n7|', '|Vn-n8|', '|Vn-n9|', '|Vn-n10|', '|Vn-n11|', '|Vn-n12|')

%% diferencias FID y exacto

figure(7) %nudos 1-6
subplot(3,1,1) %delta V fase_a
plot((0:0.25:23.75),DeltaVa(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(3,:)...
      , (0:0.25:23.75),DeltaVa(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(6,:), 'linewidth',
      2)
ylabel('FASE a')
title('DeltaV n1-6 exacto y FID')
legend('|DeltaVa-n1|', '|DeltaVa-n2|', '|DeltaVa-n3|', '|DeltaVa-n4|', '|DeltaVa-n5|', '|DeltaVa-n6|')
subplot(3,1,2) %delta V fase_b
plot((0:0.25:23.75),DeltaVb(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(3,:)...
      , (0:0.25:23.75),DeltaVb(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(6,:), 'linewidth',
      2)
ylabel('FASE b')
legend('|DeltaVb-n1|', '|DeltaVb-n2|', '|DeltaVb-n3|', '|DeltaVb-n4|', '|DeltaVb-n5|', '|DeltaVb-n6|')
subplot(3,1,3) %delta V fase_c
plot((0:0.25:23.75),DeltaVc(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(3,:)...
      , (0:0.25:23.75),DeltaVc(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(6,:), 'linewidth',
      2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|DeltaVc-n1|', '|DeltaVc-n2|', '|DeltaVc-n3|', '|DeltaVc-n4|', '|DeltaVc-n5|', '|DeltaVc-n6|')

```

```

figure(8) %nudos 7-12
subplot(3,1,1) %delta V fase_a
plot((0:0.25:23.75),DeltaVa(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(9,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVa(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa(12,:), 'linewidth
h',2)
ylabel('FASE a')
title('DeltaV n7-12 exacto y FID')
legend('|DeltaVa-n7|', '|DeltaVa-n8|', '|DeltaVa-n9|', '|DeltaVa-n10|', '|DeltaVa-n11|', '|DeltaVa-
n12|')
subplot(3,1,2) %delta V fase_b
plot((0:0.25:23.75),DeltaVb(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(9,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVb(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb(12,:), 'linewidth
h',2)
ylabel('FASE b')
legend('|DeltaVb-n7|', '|DeltaVb-n8|', '|DeltaVb-n9|', '|DeltaVb-n10|', '|DeltaVb-n11|', '|DeltaVb-
n12|')
subplot(3,1,3) %delta V fase_c
plot((0:0.25:23.75),DeltaVc(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(9,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVc(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc(12,:), 'linewidth
h',2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|DeltaVc-n7|', '|DeltaVc-n8|', '|DeltaVc-n9|', '|DeltaVc-n10|', '|DeltaVc-n11|', '|DeltaVc-
n12|')

figure(9) %delta V fase_n
subplot(2,1,1) %nudos 1-6
plot((0:0.25:23.75),DeltaVn(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(3,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVn(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(6,:), 'linewidth',
2)
ylabel('FASE n n1-6')
title('DeltaVn exacto y FID')
legend('|DeltaVn-n1|', '|DeltaVn-n2|', '|DeltaVn-n3|', '|DeltaVn-n4|', '|DeltaVn-n5|', '|DeltaVn-n6|')
subplot(2,1,2) %nudos 7-12
plot((0:0.25:23.75),DeltaVn(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(9,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVn(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn(12,:), 'linewidth
h',2)
ylabel('FASE n n7-12')
xlabel('hora')
legend('|DeltaVn-n7|', '|DeltaVn-n8|', '|DeltaVn-n9|', '|DeltaVn-n10|', '|DeltaVn-n11|', '|DeltaVn-
n12|')

%% diferencias filtro y exacto

figure(10) %nudos 1-6
subplot(3,1,1) %delta V fase_a
plot((0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(3
,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(6,:),
'linewidth',2)
ylabel('FASE a')
title('DeltaV n1-6 exacto y filtro')
legend('|DeltaVa-n1|', '|DeltaVa-n2|', '|DeltaVa-n3|', '|DeltaVa-n4|', '|DeltaVa-n5|', '|DeltaVa-n6|')
subplot(3,1,2) %delta V fase_b
plot((0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(3
,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(6,:),
'linewidth',2)
ylabel('FASE b')
legend('|DeltaVb-n1|', '|DeltaVb-n2|', '|DeltaVb-n3|', '|DeltaVb-n4|', '|DeltaVb-n5|', '|DeltaVb-n6|')
subplot(3,1,3) %delta V fase_c
plot((0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(3
,:) ...
, (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(6,:),
'linewidth',2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|DeltaVc-n1|', '|DeltaVc-n2|', '|DeltaVc-n3|', '|DeltaVc-n4|', '|DeltaVc-n5|', '|DeltaVc-n6|')

figure(11) %nudos 7-12

```

```

subplot(3,1,1) %delta V fase_a
plot((0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(9,
,:),...)

, (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVa_fil(12,
:), 'linewidth',2)
ylabel('FASE a')
title('DeltaV n7-12 exacto y filtro')
legend('|DeltaVa-n7|', '|DeltaVa-n8|', '|DeltaVa-n9|', '|DeltaVa-n10|', '|DeltaVa-n11|', '|DeltaVa-
n12|')
subplot(3,1,2) %delta V fase_b
plot((0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(9,
,:),...)

, (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVb_fil(12,
:), 'linewidth',2)
ylabel('FASE b')
legend('|DeltaVb-n7|', '|DeltaVb-n8|', '|DeltaVb-n9|', '|DeltaVb-n10|', '|DeltaVb-n11|', '|DeltaVb-
n12|')
subplot(3,1,3) %delta V fase_c
plot((0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(9,
,:),...)

, (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVc_fil(12,
:), 'linewidth',2)
ylabel('FASE c')
xlabel('hora')
legend('|DeltaVc-n7|', '|DeltaVc-n8|', '|DeltaVc-n9|', '|DeltaVc-n10|', '|DeltaVc-n11|', '|DeltaVc-
n12|')

figure(12) %delta V fase_n
subplot(2,1,1) %nudos 1-6
plot((0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(1,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(2,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(3,
,:),...)

, (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(4,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(5,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(6,:),
'linewidth',2)
ylabel('FASE n n1-6')
title('DeltaVn exacto y filtro')
legend('|DeltaVn-n1|', '|DeltaVn-n2|', '|DeltaVn-n3|', '|DeltaVn-n4|', '|DeltaVn-n5|', '|DeltaVn-n6|')
subplot(2,1,2) %nudos 7-12
plot((0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(7,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(8,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(9,
,:),...)

, (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(10,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(11,:), (0:0.25:23.75),DeltaVn_fil(12,
:), 'linewidth',2)
ylabel('FASE n n7-12')
xlabel('hora')
legend('|DeltaVn-n7|', '|DeltaVn-n8|', '|DeltaVn-n9|', '|DeltaVn-n10|', '|DeltaVn-n11|', '|DeltaVn-
n12|')

%% PLOTS INTENSIDADES

%% exacto

figure(13)
subplot(3,1,1) %tensiones en fase_a en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum(12,:))
ylabel('FASE a')
title('Intensidades en ramas a,b,c exacto')
legend('|Ia-n1|', '|Ia-n2|', '|Ia-n3|', '|Ia-n4|', '|Ia-n5|', '|Ia-n6|'...
, '|Ia-n7|', '|Ia-n8|', '|Ia-n9|', '|Ia-n10|', '|Ia-n11|', '|Ia-n12|')
subplot(3,1,2) %tensiones en fase_b en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum(12,:))
ylabel('FASE b')
legend('|Ib-n1|', '|Ib-n2|', '|Ib-n3|', '|Ib-n4|', '|Ib-n5|', '|Ib-n6|'...
, '|Ib-n7|', '|Ib-n8|', '|Ib-n9|', '|Ib-n10|', '|Ib-n11|', '|Ib-n12|')
subplot(3,1,3) %tensiones en fase_c en cada nudo

```

```

plot((0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum(12,:))
ylabel('FASE c')
legend('|Ic-n1|','|Ic-n2|','|Ic-n3|','|Ic-n4|','|Ic-n5|','|Ic-n6|'...
, '|Ic-n7|','|Ic-n8|','|Ic-n9|','|Ic-n10|','|Ic-n11|','|Ic-n12|')

figure(14) %tensiones en fase_n en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_In_acum(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum(12,:))
ylabel('FASE n')
xlabel('hora')
title('Intensidades rama neutro exacto')
legend('|In-n1|','|In-n2|','|In-n3|','|In-n4|','|In-n5|','|In-n6|'...
, '|In-n7|','|In-n8|','|In-n9|','|In-n10|','|In-n11|','|In-n12|')

%% con FID

figure(15)
subplot(3,1,1) %tensiones en fase_a en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_FID(12,:))
ylabel('FASE a')
title('Intensidades en ramas a,b,c FID')
legend('|Ia-n1|','|Ia-n2|','|Ia-n3|','|Ia-n4|','|Ia-n5|','|Ia-n6|'...
, '|Ia-n7|','|Ia-n8|','|Ia-n9|','|Ia-n10|','|Ia-n11|','|Ia-n12|')
subplot(3,1,2) %tensiones en fase_b en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_FID(12,:))
ylabel('FASE b')
legend('|Ib-n1|','|Ib-n2|','|Ib-n3|','|Ib-n4|','|Ib-n5|','|Ib-n6|'...
, '|Ib-n7|','|Ib-n8|','|Ib-n9|','|Ib-n10|','|Ib-n11|','|Ib-n12|')
subplot(3,1,3) %tensiones en fase_c en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_FID(12,:))
ylabel('FASE c')
legend('|Ic-n1|','|Ic-n2|','|Ic-n3|','|Ic-n4|','|Ic-n5|','|Ic-n6|'...
, '|Ic-n7|','|Ic-n8|','|Ic-n9|','|Ic-n10|','|Ic-n11|','|Ic-n12|')

figure(16) %tensiones en fase_n en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(2,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(3,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(4,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(5,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(6,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(7,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(8,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(9,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(10,:)...
, (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(11,:), (0:0.25:23.75),Rama_In_acum_FID(12,:))
ylabel('FASE n')
xlabel('hora')
title('Intensidades rama neutro FID')
legend('|In-n1|','|In-n2|','|In-n3|','|In-n4|','|In-n5|','|In-n6|'...
, '|In-n7|','|In-n8|','|In-n9|','|In-n10|','|In-n11|','|In-n12|')

figure(16) %acoplamientos fase_a
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDa_acum(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase a')
xlabel('hora')
legend('|FID|a-acum nudo 2','|FID|a-acum nudo 3','|FID|a-acum nudo 4','|FID|a-acum nudo
5','|FID|a-acum nudo 6')

```

```

subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDa_acum(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 Y FASE a')
legend('|FID|a-acum nudo 7','|FID|a-acum nudo 8','|FID|a-acum nudo 9','|FID|a-acum nudo 10','|FID|a-acum nudo 11','|FID|a-acum nudo 12')

figure(17) %acoplamiento fase_b
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDb_acum(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase b')
xlabel('hora')
legend('|FID|b-acum nudo 2','|FID|b-acum nudo 3','|FID|b-acum nudo 4','|FID|b-acum nudo 5','|FID|b-acum nudo 6')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDb_acum(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 fase b')
xlabel('hora')
legend('|FID|b-acum nudo 7','|FID|b-acum nudo 8','|FID|b-acum nudo 9','|FID|b-acum nudo 10','|FID|b-acum nudo 11','|FID|b-acum nudo 12')

figure(18) %acoplamiento fase_c
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDc_acum(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase c')
xlabel('hora')
legend('|FID|c-acum nudo 2','|FID|c-acum nudo 3','|FID|c-acum nudo 4','|FID|c-acum nudo 5','|FID|c-acum nudo 6')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDc_acum(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 fase c')
xlabel('hora')
legend('|FID|c-acum nudo 7','|FID|c-acum nudo 8','|FID|c-acum nudo 9','|FID|c-acum nudo 10','|FID|c-acum nudo 11','|FID|c-acum nudo 12')

figure(19) %acoplamiento fase_n
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDn_acum(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase n')
xlabel('hora')
legend('|FID|n-acum nudo 2','|FID|n-acum nudo 3','|FID|n-acum nudo 4','|FID|n-acum nudo 5','|FID|n-acum nudo 6')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75),Nudo_FIDn_acum(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 fase n')
xlabel('hora')
legend('|FID|n-acum nudo 7','|FID|n-acum nudo 8','|FID|n-acum nudo 9','|FID|n-acum nudo 10','|FID|n-acum nudo 11','|FID|n-acum nudo 12')

%% con filtro

figure(20)
subplot(3,1,1) %tensiones en fase a en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(1,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(2,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(3,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(4,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(5,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(6,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(7,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(8,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(9,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(10,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(11,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ia_acum_fil(12,:))
ylabel('FASE a')
title('Intensidades en ramas a,b,c filtro')
legend('|Ia-n1|','|Ia-n2|','|Ia-n3|','|Ia-n4|','|Ia-n5|','|Ia-n6|'...
      '|Ia-n7|','|Ia-n8|','|Ia-n9|','|Ia-n10|','|Ia-n11|','|Ia-n12|')
subplot(3,1,2) %tensiones en fase b en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(1,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(2,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(3,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(4,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(5,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(6,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(7,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(8,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(9,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(10,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(11,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ib_acum_fil(12,:))
ylabel('FASE b')
legend('|Ib-n1|','|Ib-n2|','|Ib-n3|','|Ib-n4|','|Ib-n5|','|Ib-n6|'...
      '|Ib-n7|','|Ib-n8|','|Ib-n9|','|Ib-n10|','|Ib-n11|','|Ib-n12|')
subplot(3,1,3) %tensiones en fase c en cada nudo
plot((0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(1,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(2,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(3,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(4,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(5,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(6,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(7,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(8,:)...
      ,(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(9,:),(0:0.25:23.75),Rama_Ic_acum_fil(10,:)...

```



```

    , (0:0.25:23.75), Rama_Ic_acum_fil(11,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ic_acum_fil(12,:))
ylabel('FASE c')
legend('|Ic-n1|', '|Ic-n2|', '|Ic-n3|', '|Ic-n4|', '|Ic-n5|', '|Ic-n6|'...
      , '|Ic-n7|', '|Ic-n8|', '|Ic-n9|', '|Ic-n10|', '|Ic-n11|', '|Ic-n12|')

figure(21) %tensiones en fase_n en cada nudo
plot((0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(2,:)...
      , (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(3,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(4,:)...
      , (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(5,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(6,:)...
      , (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(7,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(8,:)...
      , (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(9,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(10,:)...
      , (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(11,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(12,:))
ylabel('FASE n')
xlabel('hora')
title('Intensidades rama neutro filtro')
legend('|In-n1|', '|In-n2|', '|In-n3|', '|In-n4|', '|In-n5|', '|In-n6|'...
      , '|In-n7|', '|In-n8|', '|In-n9|', '|In-n10|', '|In-n11|', '|In-n12|')

figure(22) %acoplamientos fase_a
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDa_acum_fil(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase a')
xlabel('hora')
legend('|FID|a-acum fil nudo 2|', '|FID|a-acum fil nudo 3|', '|FID|a-acum fil nudo 4|', '|FID|a-acum
fil nudo 5|', '|FID|a-acum fil nudo 6|')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDa_acum_fil(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 Y FASE a')
legend('|FID|a-acum fil nudo 7|', '|FID|a-acum fil nudo 8|', '|FID|a-acum fil nudo 9|', '|FID|a-acum
fil nudo 10|', '|FID|a-acum fil nudo 11|', '|FID|a-acum fil nudo 12|')

figure(23) %acoplamientos fase_b
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDb_acum_fil(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase b')
xlabel('hora')
legend('|FID|b-acum fil nudo 2|', '|FID|b-acum fil nudo 3|', '|FID|b-acum fil nudo 4|', '|FID|b-acum
fil nudo 5|', '|FID|b-acum fil nudo 6|')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDb_acum_fil(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 fase b')
xlabel('hora')
legend('|FID|b-acum fil nudo 7|', '|FID|b-acum fil nudo 8|', '|FID|b-acum fil nudo 9|', '|FID|b-acum
fil nudo 10|', '|FID|b-acum fil nudo 11|', '|FID|b-acum fil nudo 12|')

figure(24) %acoplamientos fase_c
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDc_acum_fil(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase c')
xlabel('hora')
legend('|FID|c-acum fil nudo 2|', '|FID|c-acum fil nudo 3|', '|FID|c-acum fil nudo 4|', '|FID|c-acum
fil nudo 5|', '|FID|c-acum fil nudo 6|')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDc_acum_fil(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 fase c')
xlabel('hora')
legend('|FID|c-acum fil nudo 7|', '|FID|c-acum fil nudo 8|', '|FID|c-acum fil nudo 9|', '|FID|c-acum
fil nudo 10|', '|FID|c-acum fil nudo 11|', '|FID|c-acum fil nudo 12|')

figure(25) %acoplamientos fase_n
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDn_acum_fil(2:6,:))
ylabel('FID nudo 2-6 fase n')
xlabel('hora')
legend('|FID|n-acum fil nudo 2|', '|FID|n-acum fil nudo 3|', '|FID|n-acum fil nudo 4|', '|FID|n-acum
fil nudo 5|', '|FID|n-acum fil nudo 6|')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75), Nudo_FIDn_acum_fil(7:12,:))
ylabel('FID nudo 7-12 fase n')
xlabel('hora')
legend('|FID|n-acum fil nudo 7|', '|FID|n-acum fil nudo 8|', '|FID|n-acum fil nudo 9|', '|FID|n-acum
fil nudo 10|', '|FID|n-acum fil nudo 11|', '|FID|n-acum fil nudo 12|')

%% diferencias FID y exacto

figure(26) %rama 1
subplot(3,1,1)
plot((0:0.25:23.75), Rama_Ia_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ia_acum(1,:))
ylabel('Ia')

```



```

title('Intensidades por la rama 1 fase a,b,c')
legend('Rama FID', 'Rama exacto')
subplot(3,1,2)
plot((0:0.25:23.75), Rama_Ib_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ib_acum(1,:))
ylabel('Ib')
legend('Rama FID', 'Rama exacto')
subplot(3,1,3)
plot((0:0.25:23.75), Rama_Ic_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ic_acum(1,:))
ylabel('Ic')
xlabel('hora')
legend('Rama FID', 'Rama exacto')

figure(26) %rama 1
plot((0:0.25:23.75), Rama_In_acum_FID(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum(1,:))
ylabel('In')
xlabel('hora')
title('Intensidades por la rama 1 fase n')
legend('Rama FID', 'Rama exacto')

%% diferencias filtro y exacto

figure(27) %rama 1
subplot(3,1,1)
plot((0:0.25:23.75), Rama_Ia_acum_fil(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ia_acum(1,:))
ylabel('Ia')
title('Intensidades por la rama 1 fase a,b,c')
legend('Rama filtro', 'Rama exacto')
subplot(3,1,2)
plot((0:0.25:23.75), Rama_Ib_acum_fil(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ib_acum(1,:))
ylabel('Ib')
legend('Rama filtro', 'Rama exacto')
subplot(3,1,3)
plot((0:0.25:23.75), Rama_Ic_acum_fil(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_Ic_acum(1,:))
ylabel('Ic')
xlabel('hora')
legend('Rama filtro', 'Rama exacto')

figure(28) %rama 1
plot((0:0.25:23.75), Rama_In_acum_fil(1,:), (0:0.25:23.75), Rama_In_acum(1,:))
ylabel('In')
xlabel('hora')
title('Intensidades por la rama 1 fase n')
legend('Rama filtro', 'Rama exacto')

%% PLOTS POTENCIAS

%% exacto

figure(29) %potencias y pérdidas totales
plot((0:0.25:23.75), P_total, (0:0.25:23.75), Q_total, (0:0.25:23.75), Ploss_total, (0:0.25:23.75), Qloss_total, (0:0.25:23.75), Pced, (0:0.25:23.75), Qced, 'linewidth', 2)
title('Potencias P y Q exacto')
ylabel('KW/KVAr')
xlabel('hora')
legend('Ptotal', 'Qtotat', 'Ploss', 'Qloss', 'Pced', 'Qced')

%% con FID

figure(30) %potencias y pérdidas totales
plot((0:0.25:23.75), P_total, (0:0.25:23.75), Q_total, (0:0.25:23.75), Ploss_total_FID, (0:0.25:23.75), Qloss_total_FID, (0:0.25:23.75), Pced_tot_FID, (0:0.25:23.75), Qced_tot_FID, 'linewidth', 2)
title('Potencias P y Q FID')
ylabel('KW/KVAr')
xlabel('hora')
legend('Ptotal', 'Qtotat', 'Ploss FID', 'Qloss FID', 'Pced FID', 'Qced FID')

%% con filtro

figure(31) %potencias y pérdidas totales
plot((0:0.25:23.75), P_total_fil, (0:0.25:23.75), Q_total_fil, (0:0.25:23.75), Ploss_total_fil, (0:0.25:23.75), Qloss_total_fil, (0:0.25:23.75), Pced_tot_fil, (0:0.25:23.75), Qced_tot_fil, 'linewidth', 2)
title('Potencias P y Q filtro')
ylabel('KW/KVAr')
xlabel('hora')
legend('Ptotal', 'Qtotat', 'Ploss fil', 'Qloss fil', 'Pced fil', 'Qced fil')

%% diferencias FID y exacto

```

```

figure(32) %pérdidas
plot((0:0.25:23.75),Ploss_total,(0:0.25:23.75),Ploss_total_FID)
title('Pérdidas FID y exacto')
ylabel('kW/kVar')
xlabel('hora')
legend('Ploss','Ploss FID')

figure(33) %delta P
plot((0:0.25:23.75),DeltaPloss,'linewidth',2)
ylabel('kW/kVar')
xlabel('hora')
title('DeltaPloss FID y exacto')
legend('|DeltaPloss|')

%% diferencias filtro y exacto

figure(34) %pérdidas
plot((0:0.25:23.75),Ploss_total,(0:0.25:23.75),Ploss_total_fil)
title('Pérdidas filtro y exacto')
ylabel('kW/kVar')
xlabel('hora')
legend('Ploss exacto','Ploss fil')

figure(35) %delta P: pérdidas
plot((0:0.25:23.75),DeltaPloss_fil,'linewidth',2)
ylabel('kW/kVar')
xlabel('hora')
title('DeltaPloss filtro y exacto')
legend('|DeltaPloss fil|')

%% todo

figure(36) %pérdidas
plot((0:0.25:23.75),Ploss_total,(0:0.25:23.75),Ploss_total_FID,(0:0.25:23.75),Ploss_total_fil)
title('Pérdidas con/sin FID y filtro')
ylabel('kW/kVar')
xlabel('hora')
legend('Ploss','Ploss FID','Ploss fil')

%% otros

figure(37) %suma de FID en el neutro
subplot(2,1,1)
plot((0:0.25:23.75),SumaFIDneutro(1:6,:))
ylabel('FID 1-6 (A)')
xlabel('hora')
title('Suma FID en el neutro')
legend('|FID|n nudo 1','|FID|n nudo 2','|FID|n nudo 3','|FID|n nudo 4','|FID|n nudo 5','|FID|n nudo 6')
subplot(2,1,2)
plot((0:0.25:23.75),SumaFIDneutro(7:12,:))
ylabel('FID 7-12 (A)')
legend('|FID|n nudo 7','|FID|n nudo 8','|FID|n nudo 9','|FID|n nudo 10','|FID|n nudo 11','|FID|n nudo 12')

figure(38) %cargas
plot((0:0.25:23.75),Scarga(8:12,:))
ylabel('kVA')
xlabel('hora')
title('Potencia de las cargas')
legend('Carga nudo 8','Carga nudo 9','Carga nudo 10','Carga nudo 11','Carga nudo 12')

```

ANEXO B

En el presente anexo se van a representar los perfiles de cargas que se obtienen en cada nudo con carga una vez realizada la redistribución de cargas y aplicado el factor de escala. La idea de esta representación es tener una idea de cómo son los perfiles de entrada que se le están introduciendo a la red. Estos perfiles se ven modificados debido a los límites de intensidad, por lo que resulta de gran interés observar su resultado final.

Se van a mostrar todos los casos de los ensayos simulados en el Capítulo 6 además del caso equilibrado del Capítulo 5.

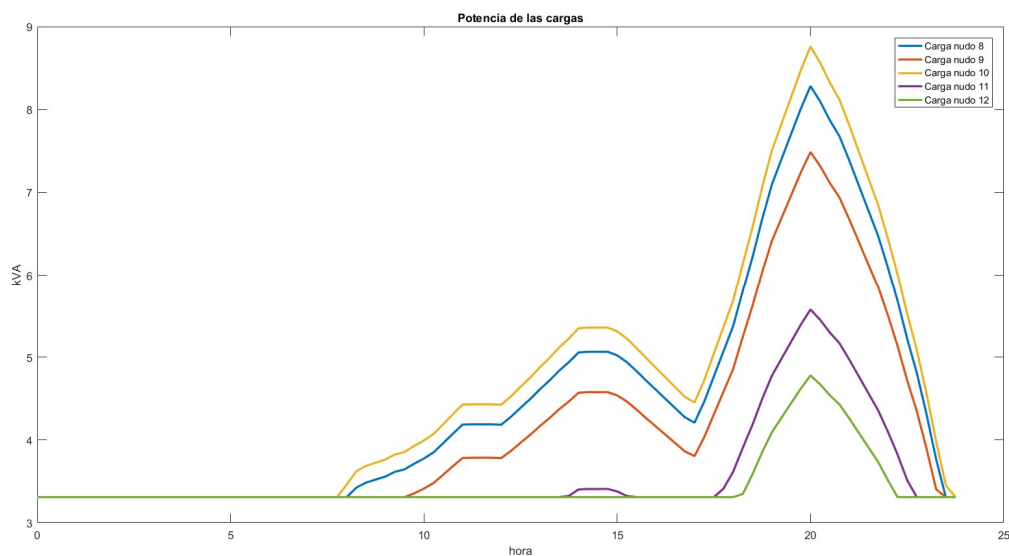


Figura B-1. Perfil de cargas caso equilibrado

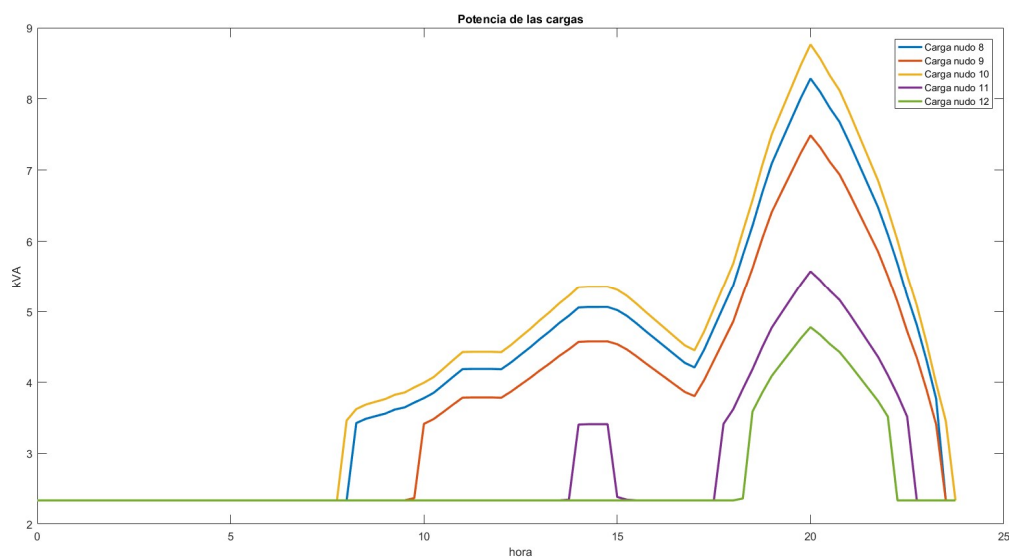


Figura B-2. Perfil de cargas ensayo 1

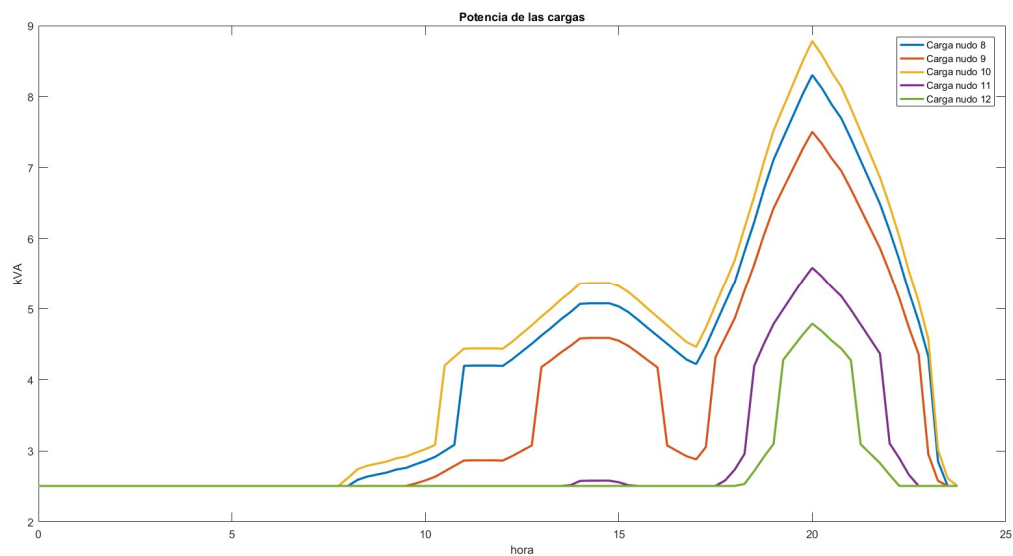


Figura B-3. Perfil de cargas ensayo 2

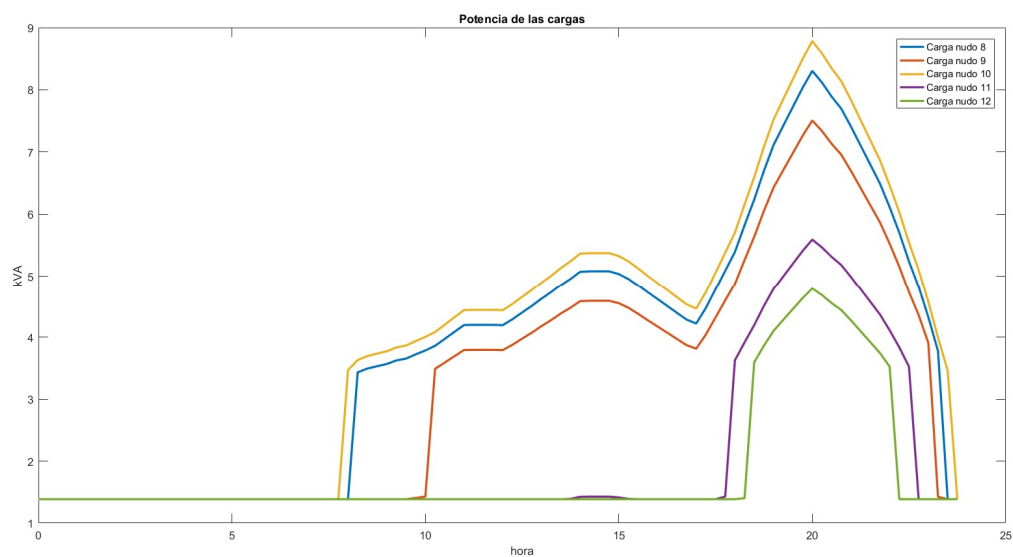


Figura B-4. Perfil de cargas ensayo 3

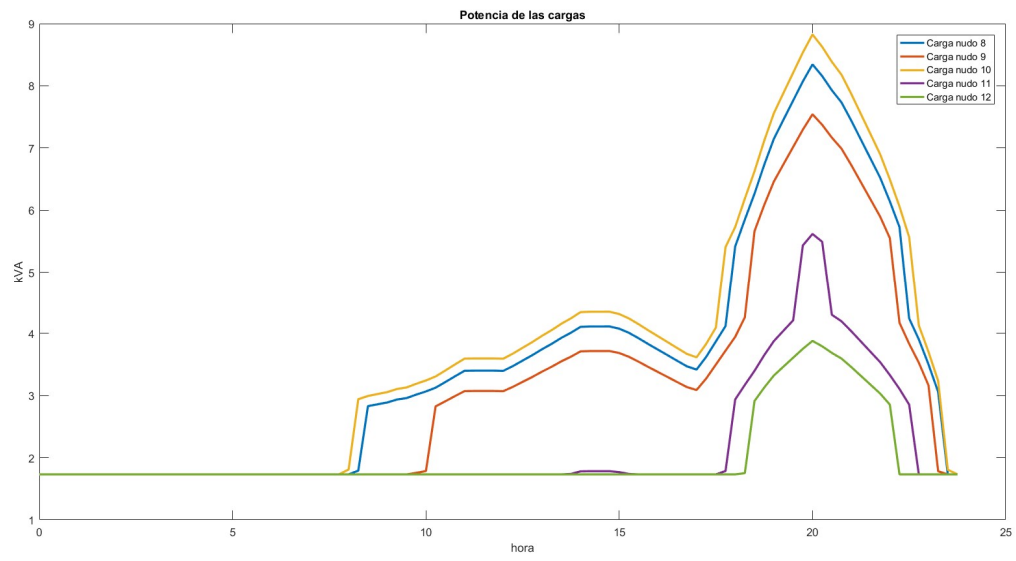


Figura B-5. Perfil de cargas ensayo 4

REFERENCIAS

- [1] CIGRE, «Benchmarks Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources,» 2014.
- [2] G. D. VDE, *Norma German DIN VDE para cables subterráneos*.
- [3] R. S. L. Heinhold, *Power cables and their applications: part 2*, Wiley-VCH, 1993.
- [4] T. A. Short, *Electric power distribution handbook*, CRC Press, 2004.
- [5] A. Gomez Espósito, *Fundamentos de teoría de circuitos*, Sevilla: Parainfo, S.A., 2007.
- [6] Clarkia, «Clarkia,» [En línea]. Available: <http://www.clarkia1.net/fam02/fam02.htm>.
- [7] INELEC, «INELEC,» [En línea]. Available: <https://www.inelec.net/componentes/index.php>.
- [8] Arcol, «Arcol,» [En línea]. Available: <http://www.arcolresistors.com/>.
- [9] OHMITE, «OHMITE,» [En línea]. Available: <http://www.ohmite.com/>.
- [10] Fischer, «Fischer,» [En línea]. Available: <https://www.fischerelektronik.de/es/productos/disipadores-fcool/disipadores-fcool/>.
- [11] MATLAB, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [12] A. Gomez, *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*, McGrawHill, 2002.

